

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Damjan Strsoglavec

Zagreb, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Stephan Škorić

Student:

Damjan Strsoglavec

Zagreb, 2011.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Ovom prilikom zahvaljujem se mentoru dr. sc. Stephanu Škoriću na kvalitetnoj stručnoj pomoći, korisnim savjetima i strpljenju tijekom izrade rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i svima koji su mi na bilo koji način pomogli tijekom studiranja.

Damjan Strsoglavec

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA | V |
| POPIS OZNAKA..... | VI |
| SAŽETAK..... | VII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. OSNOVE OBRADIVOSTI | 2 |
| 2.1. Definicija obradivosti materijala..... | 2 |
| 2.2. Kriteriji obradivosti..... | 3 |
| 2.3. Metode za istraživanje obradivosti i funkcije obradivosti | 7 |
| 2.3.1. Komparativne metode istraživanja obradivosti..... | 7 |
| 2.3.2. Kompleksne metode istraživanja obradivosti (funkcije obradivosti) . | 11 |
| 2.4. Utjecajni faktori na obradivost | 20 |
| 2.4.1. Obradivost čelika u ovisnosti o sadržaju ugljika | 20 |
| 2.4.2. Utjecaj legiranih elemenata i primjesa na obradivost | 23 |
| 2.4.3. Obradivost u ovisnosti o toplinskoj obradi..... | 26 |
| 2.4.4. Obradivost u ovisnosti o strukturi | 28 |
| 2.4.5. Obradivost u ovisnosti o mehaničkim svojstvima | 29 |
| 2.5. Obradivost materijala za strojogradnju | 30 |
| 2.5.1. Željezni lijevovi..... | 30 |
| 2.5.2. Ugljični i niskolegirani čelici..... | 36 |
| 2.5.3. Nehrdajući čelici..... | 38 |
| 2.5.4. Čelici za cementiranje..... | 40 |
| 2.5.5. Čelici za poboljšavanje..... | 41 |
| 2.5.6. Legure magnezija | 42 |
| 2.5.7. Aluminijske legure..... | 44 |
| 2.5.8. Legure bakra..... | 47 |
| 2.5.9. Legure titana | 49 |
| 2.5.10. Legure nikla | 53 |
| 2.5.11. Legure osiromašenog urana..... | 55 |
| 3. EKSPERIMENTALNI DIO | 58 |
| 3.1. Cilj i metodologija ispitivanja | 58 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.2. | Planiranje i priprema eksperimentalnih istraživanja | 59 |
| 3.2.1. | Karakteristike stroja | 59 |
| 3.2.2. | Materijal obradka | 61 |
| 3.2.3. | Mjerni instrument | 62 |
| 3.3. | Rezultati eksperimenta..... | 64 |
| 3.3.1. | Rezultati eksperimenta za 34CrNiMo6 (Č5431)..... | 64 |
| 3.3.2. | Usporedba rezultata eksperimenta dobivenih za čelik za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431) i čelik za cementiranje 16MnCr5 (Č4320) | 76 |
| 4. | ZAKLJUČAK | 83 |
| | LITERATURA | 84 |

POPIS SLIKA

- Slika 1. Primjer podjele utjecajnih faktora na obradivost materijala [2]
 Slika 2. Parametri trošenja oštrice reznog alata
 Slika 3. Tipska krivulja trošenja reznih alata [6]
 Slika 4. Komponente sile rezanja kod kosog rezanja [4]
 Slika 5. Oblici odvojene čestice [6]
 Slika 6. Shematski prikaz procesa obrade odvajanjem čestica [7]
 Slika 7. Blok shema protokola eksperimentalnog istraživanja [8]
 Slika 8. Raspored eksperimentalnih točaka u planu pokusa " 2^2+2 "
 Slika 9. Raspored eksperimentalnih točaka u planu pokusa " $2^2+2\cdot 2+5$ "
 Slika 10. Ovisnost obradivosti o sadržaju ugljika kod nelegiranih čelika (a) Widmannstättenova struktura (b) Grubožrnata struktura [2] [9]
 Slika 11. Dio dijagrama željezo – ugljik s područjima toplinske obrade [9]
 Slika 12. Ovisnost tvrdoće o brzini rezanja za vijek trajanja alata od 30 min [10]
 Slika 13. Struktura željeznih ljevova (a) Bijeli lijev (perlit + Fe_3C), H_B 550. (b) Sivi lijev (listići grafita u feritnoj željeznoj osnovi), H_B 120. (c) Sivi lijev (grafit u feritnoj-perlitnoj željeznoj osnovi), H_B 150. (d) Sivi lijev (grafit u gruboj perlitnoj željeznoj osnovi), H_B 195. (e) Sivi lijev (grafit u finoj perlitnoj željeznoj osnovi), H_B 215. (f) Sivi lijev (grafit u perlitnoj-steaditnoj željeznoj osnovi), H_B 200. (g) Sivi lijev (grafit u perlitnoj- karbidnoj osnovi), H_B 240. [10]
 Slika 14. Tipična struktura triju željeznih ljevova (a) Crni temper (kovkasti) lijev (3.1 % C, 2.39 % Si, 0.37 % Mn), H_B 150. (b) Nodularni (žilavi) lijev (3.1 % C, 2.41 % Si, 0.43 % Mn), H_B 150. (c) Sivi željezni lijev (3.2 % C, 2.43 % Si, 0.32 % Mn), H_B 105. [10]
 Slika 15. Kontinuirana odvojena čestica kod titanovih legura. (a) Mala brzina rezanja (25mm/min). (b) Velika brzina rezanja (53 m/min). [10]
 Slika 16. Presjek HSS alata korištenog kratko vrijeme pri ultra visokoj brzini (30 sek) kako bi se vidjele izoterme. (a) Željezo sa malim udjelom ugljika (152m/min). (b) CP nikal (53 m/min). Posmak 0.25 mm/okr. [10]
 Slika 17. Tokarski obradni centar Trens SBL-500 [16]
 Slika 18. Radni prostor tokarskog obradnog centra Trens SBL-500
 Slika 19. Obradak, alat i dio mjernog uređaja sa senzorima
 Slika 20. Prikaz uređaja za mjerenje sila [17]
 Slika 21. Dijagram ovisnosti $F_c=f(v_c, a_p)$ za $f_{sr}=0,18$ mm
 Slika 22. Dijagram ovisnosti $F_c=f(v_c, f)$ za $a_p=1,7$ mm
 Slika 23. Dijagram ovisnosti $F_c=f(a_p, f)$ za $v_c=4,5$ m/s
 Slika 24. Dijagram ovisnosti $\bar{F}=f(v_c, a_p)$ za $f_{sr}=0,18$ mm
 Slika 25. Dijagram ovisnosti $\bar{F}=f(v_c, f)$ za $a_p=1,7$ mm

- Slika 26. Dijagram ovisnosti $F_t = f(a_p, f)$ za $v_c = 4,5$ m/s
Slika 27. Dijagram ovisnosti $F_p = f(a_p, f)$ za $v_c = 4,5$ m/s
Slika 28. Usporedba eksperimentalnih vrijednosti za glavnu silu rezanja F_c dobivenu kod obrade čelika za cementiranje 16MnCr5 i čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6
Slika 29. Usporedba eksperimentalnih vrijednosti za posmičnu silu rezanja F_f dobivenu kod obrade čelika za cementiranje 16MnCr5 i čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6
Slika 30. Usporedba eksperimentalnih vrijednosti za natražnu silu rezanja F_p dobivenu kod obrade čelika za cementiranje 16MnCr5 i čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6

POPIS TABLICA

- Tablica 1. Matrica plana pokusa " 2^k " (bez podataka za centar plana)
Tablica 2. Matrica plan pokusa " 2^2+2 "
Tablica 3. Matrica plan pokusa " $2^2+2\cdot 2+5$ "
Tablica 4. Kemijski sastav materijala 34CrNiMo6 (Č 5431)
Tablica 5. Kemijski sastav materijala 16MnCr5 (Č4320)
Tablica 6. Rezultati mjerenja sila rezanja na tokarskom obradnom centru Trens SBL-500 čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6.
Tablica 7. Vrijednosti parametara matematičkog modela za glavnu silu rezanja F_c
Tablica 8. Vrijednosti parametara matematičkog modela za posmičnu silu rezanja F_f
Tablica 9. Vrijednosti parametara matematičkog modela za natražnu silu rezanja F_p
Tablica 10. Vrijednosti parametara matematičkog modela za natražnu silu rezanja F_p
Tablica 11. Rezultati mjerenja sila rezanja na tokarskom obradnom centru Trens SBL-500 čelika za cementiranje 16MnCr5
Tablica 12. Vrijednosti parametara matematičkog modela za glavnu silu rezanja F_c
Tablica 13. Vrijednosti parametara matematičkog modela za posmičnu silu rezanja F_f
Tablica 14. Vrijednosti parametara matematičkog modela za natražnu silu rezanja F_p

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-----------------|--------------------------|---|
| A | $[\text{mm}^2]$ | Površina poprečnog presjeka rezanja |
| a_p | $[\text{mm}]$ | Dubina obrade |
| f | $[\text{mm}]$ | Posmak |
| F_c | $[\text{N}]$ | Glavna sila rezanja |
| F_f | $[\text{N}]$ | Posmična sila rezanja |
| F_p | $[\text{N}]$ | Natražna sila rezanja |
| F_R | $[\text{N}]$ | Rezultantna sila rezanja |
| F_x | | Funkcija sila rezanja |
| G | $[\text{N}]$ | Težina odvojene čestice |
| HB | [Brinell] | Tvrdoća po Brinell-u |
| I_0 | | Indeks obradivosti |
| KB | $[\text{mm}]$ | Širina kratera |
| KM | $[\text{mm}]$ | Udaljenost od središta kratera do vrha oštrice |
| KT | $[\text{mm}]$ | Dubina kratera |
| k | | Broj nezavisnih utjecajnih faktora |
| $K_{O\ EM}$ | | Kriterij obradivosti etalon materijala |
| $K_{O\ IM}$ | | Kriterij obradivosti ispitivanog materijala |
| L_k | $[\text{mm}]$ | Dubina rezanja |
| n | | Broj pokusa na središnjim osima |
| N | | Ukupan broj eksperimentalnih točaka |
| $O_{\check{c}}$ | | Funkcija oblika odvojene čestice |
| r | | Koeficijent korelacije |
| R_e | $[\text{N}/\text{mm}^2]$ | Granica razvlačenja |
| R_x | | Funkcija kvalitete obrađene površine |
| S_k | | Koeficijent volumena |
| T | $[\text{min}]$ | Vrijednost postojanosti alata |
| T | | Funkcija postojanosti alata |
| v_b | $[\text{m min}^{-1}]$ | Brzina trošenja alata |
| VB | $[\text{mm}]$ | Istrošenost stražnje površine alata |
| v_c | $[\text{m min}^{-1}]$ | Brzina rezanja |
| v_k | $[\text{m min}^{-1}]$ | Brzina rezanja u trenutku zatupljenja alata |
| v_L | $[\text{m min}^{-1}]$ | Brzina rezanja u trenutku zatupljenja alata na dužini L |
| V_m | $[\text{m}^3]$ | Volumen materijala obradka |
| V_{st} | $[\text{m}^3]$ | Volumen odvojene čestice |
| v_{30} | $[\text{m min}^{-1}]$ | Brzina rezanja za vijek trajanja alata od 30 min |
| v_{60} | $[\text{m min}^{-1}]$ | Brzina rezanja za vijek trajanja alata od 60 min |
| x_i | | Parametri i uvjeti obrade |

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu istražen je utjecaj materijala obradka i režima obrade na sile rezanja kod tokarenja.

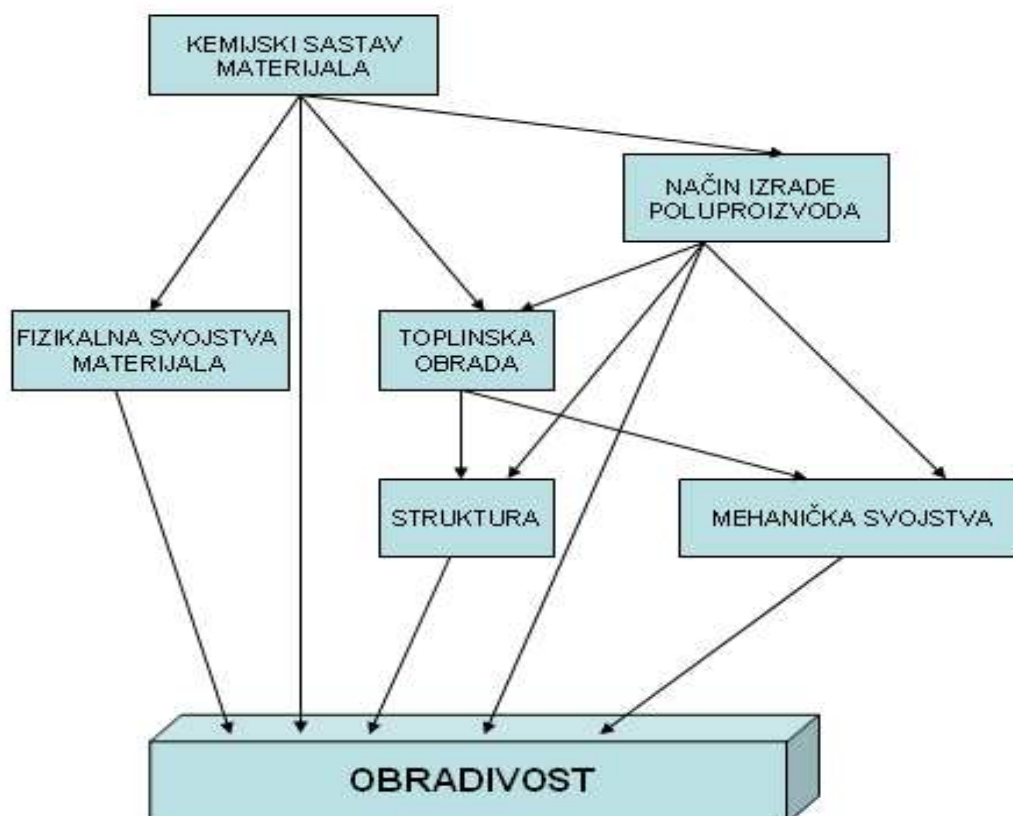
U prvom dijelu rada sistematizirane su dosadašnje spoznaje o obradivosti materijala. Opisane su definicije, kriteriji i metode obradivosti kao i matematički modeli za opisivanje obradivosti. Prikazane su spoznaje iz literature o tome kakav utjecaj na obradivost imaju kemijski sastav, legirni elementi, struktura i mehanička svojstva materijala, te kako na obradivost utječe toplinska obrada. Opisana je i obradivost najčešće korištenih materijala u strojogradnji.

U drugom dijelu prikazana su eksperimentalna istraživanja. Koristeći opremu raspoloživu u Laboratoriju za alatne strojeve izvršena su eksperimentalna istraživanja na čeliku za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431) i čeliku za cementiranje 16MnCr5 (Č4320). Ispitivanja su izvršena postupkom tokarenja. Izvršeno je ispitivanje utjecaja parametara obrade (brzina rezanja, dubina obrade i posmak) na vrijednosti sila rezanja. Zatim je napravljena statistička obrada kojom se opisuje utjecaj ulaznih veličina (parametara obrade) na sile rezanja. Na kraju su rezultati dobiveni ispitivanjem na čeliku za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431) uspoređeni s onima dobivenim ispitivanjem na čeliku za cementiranje 16MnCr5 (Č4320). Rezultati su prikazani tabelarno i grafički i vrijede samo za promatrane uvjete rezanja, korišteni alat i materijal.

1. UVOD

Primarni utjecaj na obradivost bilo koje legure ima njezin osnovni metal. Legure aluminija uglavnom imaju dobru obradivost, legure željeza pokazuju srednju obradivost, a visokotemperaturne legure uglavnom imaju lošu obradivost. Mikrostruktura metala isto ima važnu ulogu u obradivosti. Neka važna mikrostrukturalna svojstva uključuju veličinu zrna, broj i veličinu uključina, i prisutne vrste strukture metala. Općenito, čvrsta struktura i sitna zrna rezultiraju kraćim vijekom trajanja alata. Obradivost se poboljšava za strukture koje nisu čvrste i krupna zrna. Male tvrde uključine u jezgri promoviraju abrazivno trošenje alata. Meke uključine često pogoduju vijeku trajanja alata. Materijali koji tijekom obrade brzo otvrdnuju imaju manju obradivost od onih koji ne. Kemijski sastav metala je vrlo važan i ima kompleksan utjecaj na obradivost. Primarni proizvodni proces materijala isto utječe na njegovu obradivost [1].

Prof. Cebalo ovu grupu faktora prikazuje na način prikazan slikom 1.



Slika 1. Primjer podjele utjecajnih faktora na obradivost materijala [2]

2. OSNOVE OBRADIVOSTI

2.1. Definicija obradivosti materijala

Pojam obradivosti predstavlja jedan od najneodređenijih, a ujedno i najvažnijih pojmova u području tehnologije obrade odvajanjem čestica. Ono što se sa sigurnošću može tvrditi jest da se obradivost ogleda kao rezultat zajedničkog djelovanja sljedećih faktora procesa rezanja [3]:

- materijal i geometrija obradka
- materijal i geometrija alata
- SHIP (sredstvo za hlađenje i podmazivanje)

i to sve u međusobnom odnosu elemenata režima rezanja (brzina, posmak i dubina rezanja).

Očito je da se za razliku od ostalih jasno definiranih pojmova (razne fizičke, mehaničke, kemijske i druge osobine) ovdje radi o vrlo kompleksnoj kategoriji koja je određena sa mnogo utjecajnih faktora [3].

Pošto ne postoji potpuna suglasnost oko definicije obradivosti mogu se navesti neke u literaturi najčešće navođene [3].

- Obradivost se može uzeti kao mjera poteškoća koje nastaju pri obradi rezanjem određenog materijala,
- Obradivost predstavlja lakoću obrađivanja danog materijala obradka,
- Obradivost je skup većeg broja osobina materijala obradka koje pokazuju s kakvim se uspjehom može obrađivati određeni materijal,
- Obradivost je karakteristika obrađivanog materijala koja pokazuje efekt proizvodnosti i kvalitete proizvoda,
- Obradivost je jedan od osnovnih pokazatelja tehnološkičnosti materijala i odlikuje se nizom parametara koji određuju proizvodnost procesa rezanja i kvalitete obrađene površine proizvoda,
- Obradivost materijal nije jedinstvena unutrašnja osobina materijala i može se samo djelomično izraziti preko sljedeća tri odvojena aspekta:
 1. S aspekta alata – izražava se preko odnosa količine odvojenog materijala i postojanosti alata,
 2. S aspekta stroja – izražava se silama rezanja,

3. S kvalitete obrade – izražava se preko kvalitete obrađene površine

Moguća najprikladnija definicija obradivosti bi mogla biti ona po kojoj je najbolje obradiv onaj materijal koji dozvoljava najbrže odnošenje najveće količine materijala sa zadovoljavajućom kvalitetom obrađene površine [3].

Poštujući sve do sada u literaturi navedene opisne definicije može se zaključiti da je obradivost materijala osnovna tehnološka karakteristika kojom se izražava podobnost obrade nekog materijala, a ocjenjuje se skupom kriterija (ili funkcija) obradivosti " F_0 ", koristeći se pri tom skupom metoda za ispitivanje obradivosti [4].

Obradivost materijala ne određuje jedan univerzalni već više parcijalnih kriterija obradivosti. Obradivost je bolja što je veći broj kriterija ili funkcija obradivosti postiglo veći pozitivni utjecaj. Moguće je da ti rezultati budu potpuno oprečni. Na primjer moguće je da jedan materijal po kriteriju postojanosti oštrice alata ima dobru obradivost, ali zbog sklonosti stvaranju naljepka po kriteriju kvalitete obrađene površine ima lošu obradivost [4].

2.2. Kriteriji obradivosti

Obradivost različitih materijala se ocjenjuje (opisuje) sa četiri osnovna kriterija [3] [4] [5]:

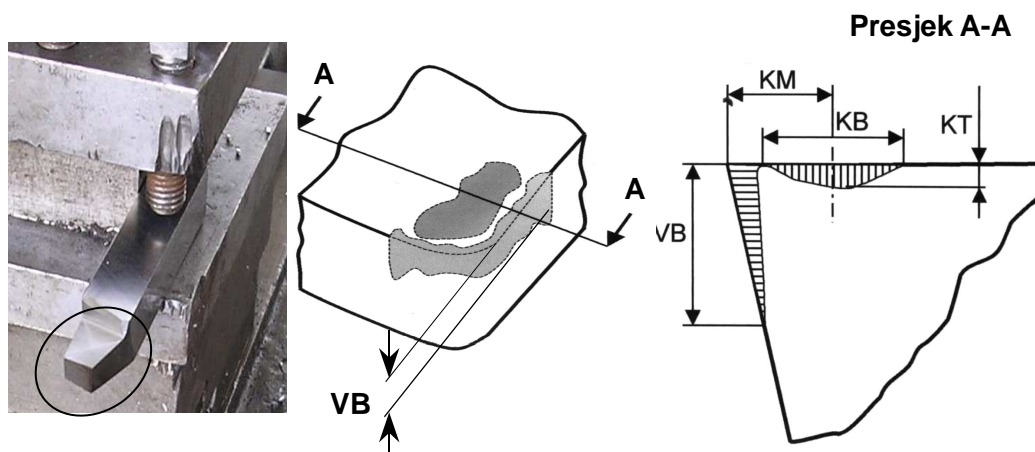
1. Postojanost alata,
2. Sile rezanja,
3. Kvaliteta obrađene površine,
4. Oblik odvojene čestice.

Važno je istaknuti da navedeni kriteriji nemaju jednaki značaj u različitim proizvodnim uvjetima i tehnološkim tokovima procesa obrade nekog materijala. To znači da je potrebno rangirati utjecajne faktore za svaki pojedini slučaj [4].

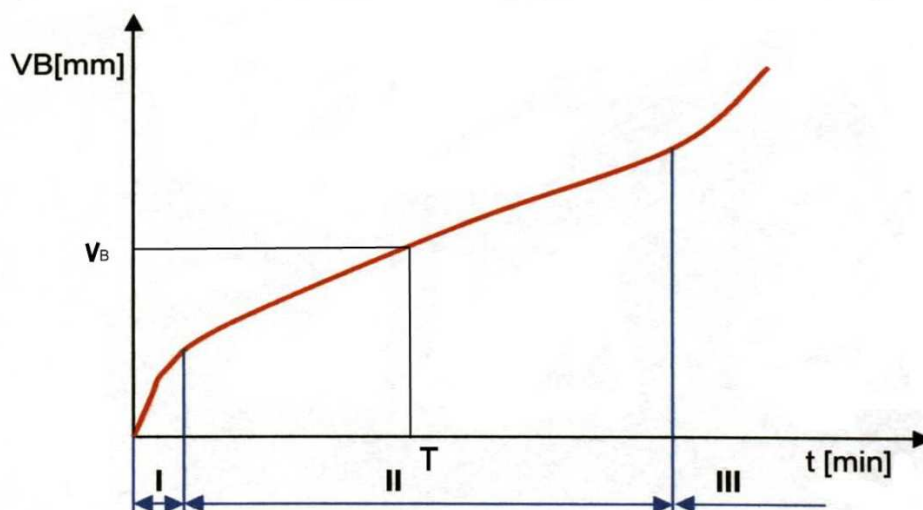
Postojanost alata – troškovi proizvodnje i vrijeme izrade zavise od postojanosti alata, pa se može reći da je određeni materijal bolje obradiv ako je veća postojanost alata. Postojanost alata predstavlja vrijeme rezanja u toku kojeg alat vrši rezanje do svog zatupljenja tj. do takvog stupnja istrošenosti zbog kojeg bi daljnja upotreba bila nemoguća. Postojanost alata se najčešće izražava u

vremenskim jedinicama, iako jedinice postojanosti mogu biti i neki drugi pokazatelji (npr. broj obrađenih komada).

Trošenje stražnje površine alata prisutno je uvijek, dok je trošenje po prednjoj površini alata, u velikom broju slučajeva, vrlo malo, tako da se interesantnim kontaktnim površinama smatraju stražnja površina alata i obrađena površina obradka [6].



Slika 2. Parametri trošenja oštrice reznog alata (VB – istošenost stražnje površine alata, KM – udaljenost od središta kratera do teorijskog vrha oštrice, KB – širina kratera, KT – dubina kratera) [6]



Slika 3. Tipaska krivulja trošenja reznih alata [6]

Tipaska krivulja (slika 3.) vrijedi za određenu kombinaciju alat-obradak i pri slijedećim uvjetima obrade [6]:

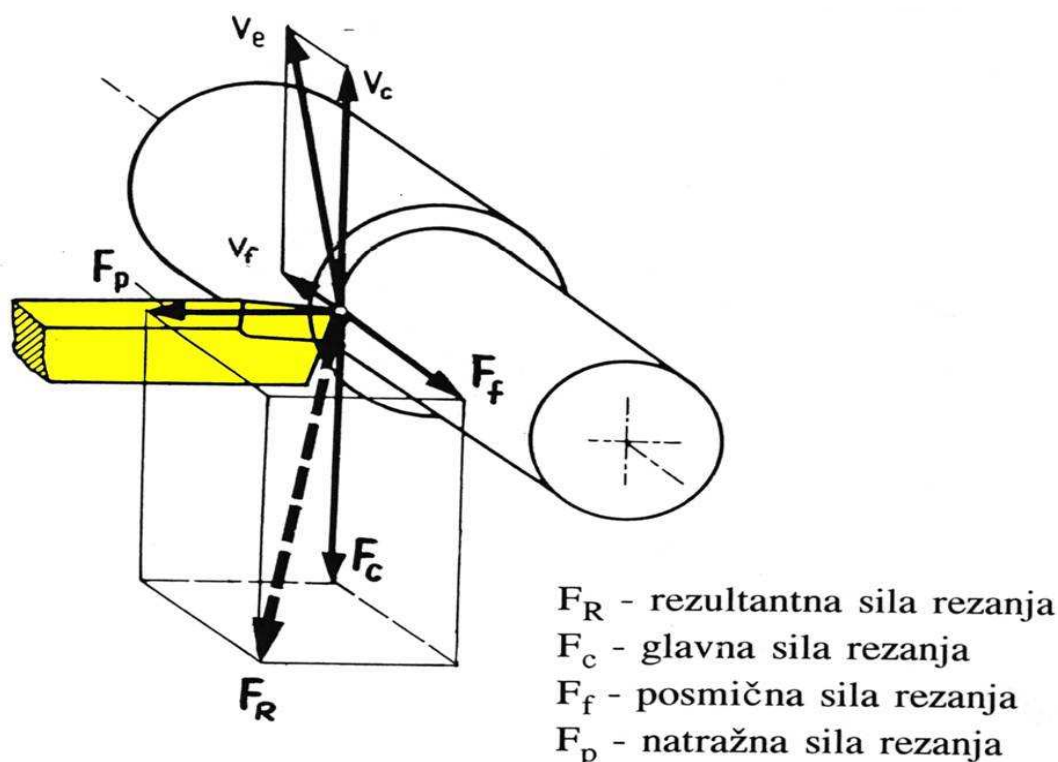
$$A = a_p \cdot f = \text{konst.}, \quad v_c = \text{konst.} \quad (1)$$

Područje I naziva se period uhodavanja, područje II period "normalnog trošenja", a područje III period naglog trošenja.

Sile rezanja - trošenje reznog alata, kao i utrošak energije pri rezanju zavise od sile rezanja, pa ako su pri obradi određenog materijala manje sile rezanja onda je isti bolje obradiv. Odvajanje površinskih slojeva materijala s reznim alatom moguće je ako se na alat narine sila F_R koja je jednaka čvrstoći i silama trenja. Najčešće se vektor rezultantne sile rezanja rastavlja na komponente sile rezanja prema slici 4. Tako kod kosog rezanja imamo tri komponente sile rezanja:

- F_c - glavna sila rezanja koja se poklapa s pravcem vektora glavne brzine rezanja,
- F_f - posmična sila rezanja koja djeluje u pravcu posmičnog gibanja alata,
- F_p - natražna sila rezanja koja djeluje u smjeru okomitom na sile F_c i F_f .

Odnosi pojedinih komponenti sile rezanja značajno se mijenjaju sa promjenom odnosa dubine i posmaka, geometrije alata, istrošenjem alata i mehaničkim svojstvima alata [5].



Slika 4. Komponente sile rezanja kod kosog rezanja [4]

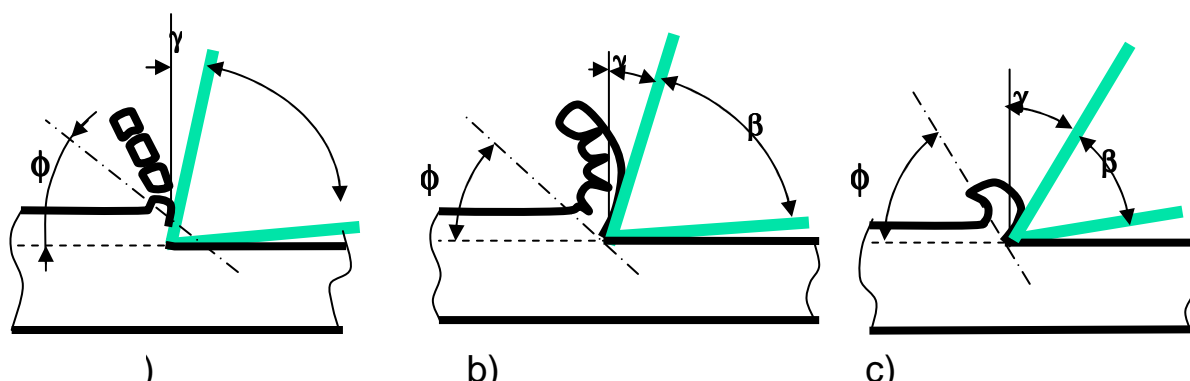
$$F_r = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (2)$$

Kvaliteta obrađene površine – bolja kvaliteta obrađene površine samim time i niža hrapavost znači kvalitetniji proizvod, pa se za materijale kod kojih se pri obradi ostvaruje bolja kvaliteta obrađene površine kaže da su bolje obradivi. Kvaliteta obrađene površine je važan kriterij za ocjenu obradivosti nekog materijala. Isto tako ona ima veliki utjecaj na eksploatacione karakteristike strojnih elemenata: otpornost na trošenje, koeficijent trenja, itd. Ovisna je o materijalu obradka, termičkoj obradi i tehnološkom procesu obrade [3].

Oblik odvojene čestice – povoljniji su oni oblici odvojene čestice koji se lakše odvede iz zone rezanja, pa se za one materijale koji daju povoljne oblike odvojene čestice kaže da su bolje obradivi.

Osnovni oblici odvojene čestice (slika 5.) su [6]:

- lomljena (elementarna) odvojena čestica
- nasječena (lamelarna) odvojena čestica (više lamela zajedno)
- tekuća (kontinuirana) odvojena čestica



Slika 5. Oblici odvojene čestice [6]

Funkcija oblika odvojene čestice, prema [4] definira se volumskim koeficijentom prema izrazu:

$$k_{oč} = \frac{V_{oč}}{V_M} \quad (3)$$

$V_{o\check{c}}$ = volumen koji zauzimaju odvojene čestice,

V_M = volumen dijela obradka koji je pretvoren u odvojenu česticu.

2.3. Metode za istraživanje obradivosti i funkcije obradivosti

Skup metoda za istraživanje obradivosti može se svrstati u dvije osnovne grupe [4]:

1. Komparativne metode, ili metode relativne obradivosti, kojima je osnovni cilj dobivanje indeksa (koeficijenta) obradivosti,
2. Kompleksne metode kojima je osnovni cilj dobivanje funkcija obradivosti.

Indeks obradivosti

Indeks ili koeficijent obradivosti je veličina definirana izrazom [4]:

$$I_0 = \frac{K_{0IM}}{K_{0EM}} \quad (4)$$

K_{0IM} - kriterij obradivosti ispitivanog materijala

K_{0EM} - kriterij obradivosti etalon materijala

Kao kriterij obradivosti uzima se onaj kriterij koji prema utvrđenom rangi za određeni proces pokazuje obradivost materijala. Kriterij obradivosti koji se najčešće koristi je brzina rezanja v_c koja odgovara nekoj vrijednosti postojanosti alata T (npr. v_{60} za $T=60$ min). Ako dani materijal dozvoljava veću vrijednost brzine rezanja uz identične ostale uvjete i parametre obrade, tada taj materijal ima bolju obradivost u odnosu na neki drugi i obrnuto.

2.3.1. Komparativne metode istraživanja obradivosti

Osnovna karakteristika komparativnih metoda je relativno ocjenjivanje obradivosti tj. određivanje indeksa obradivosti ispitivanog materijala obradka u odnosu na

usvojeni, referentni materijal. Za referentni materijal se najčešće odabire materijal sa dobrom obradivosti za promatrani kriterij obradivosti.

Za dobivanje indeksa obradivosti koriste se sljedeće metode [3] [4]:

- Metoda varijabilnih brzina rezanja
- Metoda konstantnog puta rezanja
- Metoda konstantnih sila rezanja
- Metoda radioaktivnih izotopa
- Metoda poprečne obrade
- Indirektne metode (kemijski sastav, mehaničke karakteristike, mikrostruktura itd.)
- Metoda ispitivanja oblika odvojene čestice

Metoda varijabilnih brzina rezanja – koristi se pri uzdužnoj obradi odvajanjem čestica. Kod ove metode početna brzina rezanja $v_p = v_1$ se stupnjevito povećava poslije određenih istih dužina obrade. Brzina rezanja se povećava po zakonitosti

$$v_{i+1} = 1,12 v_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

sve do trenutka zatupljenja alata, a tu brzinu označavamo sa $v_k = v_{kIM}$. Vrijednost indeksa obradivosti ispitivanog materijala određuje se izrazom

$$I_0 = \frac{v_{kIM}}{v_{kEM}} \quad (6)$$

gdje je v_{kEM} brzina rezanja u trenutku zatupljenja alata pri obradi etalon materijala.

Metoda konstantnog puta rezanja – kao kriterij za definiranje indeksa obradivosti ispitivanog materijala koristi se, u ovoj metodi, ona vrijednost brzine rezanja v_L pri kojoj (od početka rezanja oštrim alatom) nastupe prvi znakovi ili počeci zatupljenja alata na unaprijed definiranoj dužini puta rezanja. U ovoj se metodi primjenjuje iterativna eksperimentalna procedura, jer se samo pomoću nje može utvrditi tražena vrijednost brzine rezanja v_k .

Najčešće se, prema Lejenzeteru, usvaja dužina puta rezanja $L = 100$ m. Kada se utvrde vrijednosti brzine rezanja v_L pri obradi ispitivanog materijala (v_{LIM}) i etalon materijala v_{LEM} izračunava se nakon toga indeks obradivosti prema izrazu [7]:

$$I_0 = \frac{v_{LIM}}{v_{LEM}} \quad (7)$$

Metoda konstantnih sila rezanja – postiže se visoka točnost ispitivanja obradivosti. Glavno obilježje metode je bušenje obradka pri konstantnoj aksijalnoj sili. U materijalu čija se obradivost ispituje, prethodno se izbuši manji otvor koji osigurava dovođenje SHIP-a i lakše odvođenje odvojene čestice pri procesu ispitivanja. Konstantna sila bušenja se ostvaruje djelovanjem utega na vreteno na kojem se nalazi svrdlo. Ispitivanje se izvodi pri prethodno izabranoj i u toku ispitivanja konstantnoj brzini rezanja. Definira se trajanje ispitivanja tj. rezanja i tom će vremenu odgovarati određena dubina rezanja L_k . Što je ispitivani materijal teže obradiv bit će i vrijednost L_k manja, i obratno. Kod ove metode indeks obradivosti se dobiva iz izraza [7]:

$$I_0 = \frac{L_{kIM}}{L_{kEM}} \quad (8)$$

Metoda radioaktivnih izotopa – zasniva se na mjerenju trošenja alata praćenjem promjene radioaktivnosti prethodno, teškim česticama, bombardirane stražnje površine alata.

Osim komparativnog ispitivanja obradivosti ova se metoda može koristiti i kao ekspresni način za utvrđivanje funkcija obradivosti (funkcija postojanosti alata). Tada treba imati u vidu mogućnost pojave nedopustivih vrijednosti grešaka u rezultatima ispitivanja nastalih zbog relativno malih vrijednosti parametara trošenja odnosno zbog relativno kratkog vremena rezanja u toku kojeg se izvode eksperimenti.

Dobivena otpornost na trošenje izmjerena na ovaj način koristi se za računanje indeksa obradivosti na temelju izraza :

$$I_0 = \frac{v_{BIM}}{v_{BEM}} \quad (9)$$

gdje je v_{BIM} brzina trošenja alata pri obradi ispitivanog materijala, a v_{BEM} pri obradi etalon materijala [3] [7].

Metoda poprečne obrade – osnovna karakteristika ove metode je da se linearno mijenja brzina rezanja v , od neke početne vrijednosti v_0 pa do krajnje brzine v_z kada nastupa zatupljenje alata. Na disku od ispitivanog materijala promjera obično 300 do 350 mm prethodno se izbuši prolazni otvor i takav disk pričvrsti u

čeljustima. Poprečna obrada se vrši posmičnim kretanjem alata od centra prema rubu konstantnom dubinom rezanja, posmakom i pri konstantnom broj okretaja diska. Pri pomicanju alata prema rubu se na račun povećanja promjera povećava brzina rezanja čime se intenzivira trošenje alata. Trenutak potpunog zatupljenja alata odgovara nekoj brzini rezanja koja se koristi za računanje indeksa obradivosti [7].

$$I_0 = \frac{v_{zA}}{v_{zB}} = \frac{D_{zA}}{D_{zB}} \quad (10)$$

Indirektne metode – obuhvaćaju relativno ocjenjivanje obradivosti prema eksperimentalno istraženim vezama između obradivosti nekog materijala i njegovih fizičko-mehaničkih i metalurško-mikrostrukturnih karakteristika. Karakteristike koje se najčešće dovode u vezu sa obradivošću su: tvrdoća, čvrstoća, žilavost, toplinska vodljivost, mikrostruktura, kemijski sastav itd. Kada se ovi modeli eksperimentalno utvrde mogu se koristiti za prognoziranje obradivosti bez procesa rezanja, tj. indirektnim putem.

Najčešće se pri tome obradivost definira preko brzine rezanja v_T , koja odgovara izabranoj vrijednosti postojanosti alata. Tako se na bazi eksperimentalni ispitivanja može uspostaviti ovisnost obradivosti v_T nekog materijala o tvrdoći H_B i granici razvlačenja R_e prema izrazu:

$$v_{60} = \frac{C}{H_B^{1,63} \cdot R_e^{1,01}} \quad (11)$$

gdje je C – veličina zavisna od dubine rezanja, posmaku i vrsti alatnog materijala [7].

Metoda ispitivanja oblika odvojene čestice – sastoji se u kvantitativnom izražavanju oblika odvojene čestice pomoću tkz. koeficijenta volumena:

$$S_K = \frac{V_{st}}{V_m} \quad (12)$$

gdje je V_{st} volumen odvojene čestice izmjerena stavljanjem odvojene čestice u određenu posudu, ali bez pritiska, samo djelovanjem sile teže i V_m , volumen materijala obradka koja je pretvorena u odvojenu česticu. V_m se računa po izrazu:

$$V_m = \frac{1000 \cdot G}{\rho} \quad (13)$$

gdje je G težina odvojene čestice, a ρ gustoća obradka [3].

2.3.2. **Kompleksne metode istraživanja obradivosti (funkcije obradivosti)**

Kompleksne metode dobile su naziv po tome što su zasnovane na eksperimentalnom istraživanju prema potpunim višefaktorskim planovima eksperimenta. S obzirom da ovdje eksperimenti traju do zadanog kriterija istrošenosti alata, dakle dosta dugo, ove metode se nazivaju dugotrajnim. Bez obzira radi li se o istraživanju obradivosti s obzirom na postojanost alata ili neki drugi kriterij metoda ispitivanja je ista: planiranje eksperimenta, izvođenje eksperimenta i obrada rezultata.

Dakle, svrha kompleksnih metoda je dobivanje matematičkih modela procesa obrade odnosno funkcija obradivosti. Funkcije obradivosti su matematički modeli kojima se opisuje uzajamna ovisnost ulaznih i izlaznih parametara procesa obrade i predstavljaju aproksimaciju stvarnog oblika funkcije procesa. Upotrebljavaju se u svrhu [5]:

- definiranja i optimiranja procesa obrade,
- predviđanja intenziteta utjecaja pojedinih utjecajnih faktora u fazi projektiranja i simuliranja procesa obrade,
- sigurnog vođenja i nadzora procesa obrade.

Skup osnovnih funkcija obradivosti u obradi odvajanjem čestica prema [4] [5] čine:

1. funkcija postojanosti alata, $T = T(x_i)$,
2. funkcija sila rezanja, $F_x = F_x(x_i)$,
3. funkcija kvalitete obrađene površine, $R_x = R_x(x_i)$,
4. funkcija oblika odvojene čestice, $O_{\varepsilon} = O_{\varepsilon}(x_i)$.

(x_i -parametri i uvjeti obrade)

Metode za dobivanje funkcija obradivosti su različiti višefaktorski planovi pokusa. Krajnji rezultat su matematički modeli koji predstavljaju aproksimaciju stvarnog,

nepoznatog, analitičkog oblika funkcije pojava, te međuovisnost ulaznih i izlaznih veličina procesa obrade odvajanjem.

Višefaktorski planovi pokusa

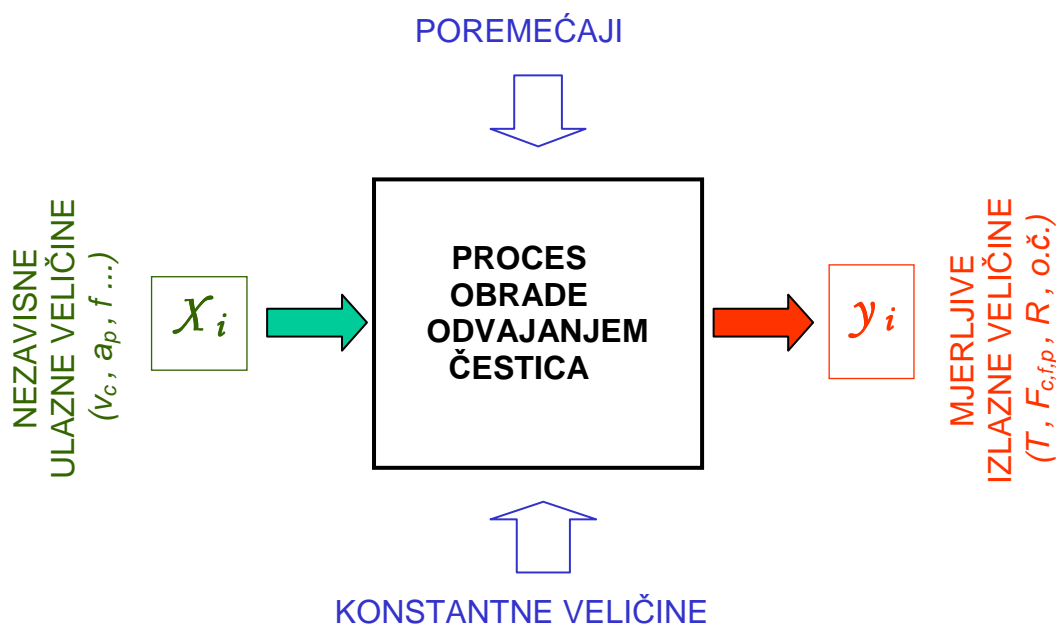
Metode za dobivanje funkcija obradivosti su različiti eksperimentalni statistički višefaktorski planovi. Krajnji rezultat su matematički modeli kojima se opisuje uzajamna ovisnost ulaznih i izlaznih parametara procesa obrade.

Na slici 6. shematski je prikazan proces obrade odvajanjem čestica sa svim ulazima i izlazom potrebnim za definiranje matematičkog modela procesa.

Pred istraživačem su dva bitna zadatka:

- istražiti koji ulazi (x_i) signifikantno djeluju na izlaz (y_i),
- odrediti funkcionalnu ovisnost izlaza o ulazu.

Jedna funkcija obradivosti ne mora sadržavati sve signifikantne ulaze (niti je to moguće), već samo one koji su za određeni konkretni slučaj potrebne. Svi ostali signifikantni ulazi koji taj tren nisu interesantni da uđu u model moraju se tretirati kao konstante. Pri tome valja uvijek imati na umu da jedna funkcija obradivosti vrijedi za točno određene uvjete obrade, koji su na slici označeni kao "konstante". To praktično znači da za bilo koju drugu kombinaciju konstanti vrijedi neki drugi matematički model. Matematički model je dakle bezvrijedan ako uz njega nisu navedeni uvjeti obrade. "Poremećaji" su također uvjeti obrade, ali na njih se ne može utjecati (na primjer variranje napona u strujnoj mreži).



Slika 6. Shematski prikaz procesa obrade odvajanjem čestica [7]

Planirati pokus znači, na osnovi spoznaja iz literature, iskustva i očekivanja željenog cilja, unaprijed predvidjeti sve utjecajne faktore i radnje koje će kroz racionalna istraživanja dovesti do novih spoznaja. To praktično znači da je to način definiranja protokola za iznalaženje funkcionalnih ovisnosti između izlaza i ulaza procesa prikazanog na slici 6.

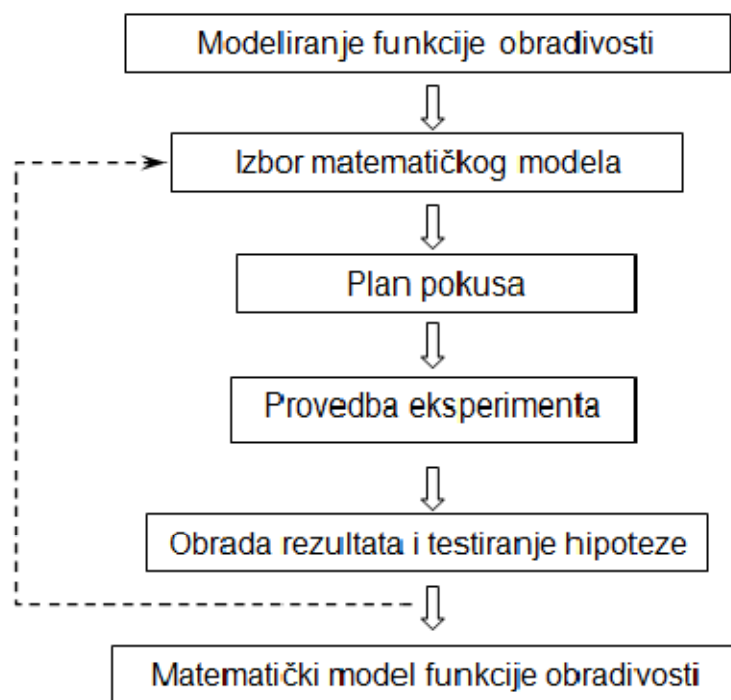
U osnovi planovi pokusa se mogu podijeliti u dvije grupe [8]:

- jednofaktorski plan pokusa; što predstavlja klasičnu metodu eksperimentiranja s jednom varijablom,
- višefaktorski statistički planovi pokusa (suvremene metode eksperimentiranja).

Budući je proces obrade odvajanjem čestica označen mnogobrojnim utjecajnim faktorima, koji direktno ili međusobno, a po jačini djelovanja različito, djeluju na tijek i ishod pokusa te zbog statističkog karaktera procesa, nužno je da pokus bude vođen statističkom višefaktorskom metodom [8]. Višefaktorski plan pokusa odlikuje se slijedećim značajkama [8]:

- u tijeku eksperimenta varira se više utjecajnih faktora istodobno,
- poseban raspored eksperimentalnih točaka u prostoru,
- minimalan broj eksperimentalnih točaka u odnosu na količinu dobivenih informacija o zakonitosti procesa,
- relativno jednostavna matematička obrada rezultata,
- daje uvid u ovisnosti među faktorima (interakcije).

U praksi, a ponegdje i u literaturi pod pojmom plana pokusa često se kriju dva pojma: plan pokusa u širem smislu, ili plan pokusa u užem smislu. Plan pokusa u širem smislu označava eksperimentalno istraživanje za dobivanje funkcije obradivosti, a koje se odvija po točno utvrđenom protokolu, prikazanom blok shemom na slici 7.



Slika 7. Blok shema protokola eksperimentalnog istraživanja [8]

Kako prikazuje blok shema, eksperimentalno istraživanje započinje izborom matematičkog modela za kojeg se pretpostavlja da će biti dovoljno točna aproksimacija stvarnog, nepoznatog, analitičkog oblika funkcije odziva. Definirati matematički model ne znači samo odrediti njegov stupanj, već i načiniti izbor nezavisnih utjecajnih faktora koji su u tom trenutku od interesa istraživača i koji će ući u model. Svi ostali potencijalni faktori moraju biti konstantni. To u stvari označava postavljanje hipoteze. Nakon provedbe eksperimenta i obrade rezultata hipoteza se testira. Ako se pokaže da matematički model nije adekvatan, postupak počinje ispočetka postavljanjem novog matematičkog modela, ili izborom drugačijeg intervala variranja faktora modela.

Plan pokusa u užem smislu znači odrediti, za definirani matematički model: broj točaka pokusa, interval variranja faktora, način i broj ponavljanja i plan matricu pokusa [8].

Matematički modeli

Ako su u procesu obrade, čija je stvarna funkcija stanja procesa nepoznata, definirani ulazi ($x_i, i=1,2,3,...k$) onda se matematički model procesa može napisati u obliku [8]:

$$\eta = \phi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (14)$$

Funkcija η je hipotetična veličina. U matematičkom modelu koji se dobije nakon eksperimentalnog istraživanja prisutna je greška eksperimenta (ε) pa vrijedi slijedeći model [8]:

$$y = \phi(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (15)$$

Matematički model (15) predstavlja, ako je adekvatan, dovoljno točnu aproksimaciju stvarnog, nepoznatog, analitičkog oblika funkcije odziva. Ako se označi očekivani odziv sa $E(y) = \eta$ onda se površina prikazana sa “ η ” naziva odzivna površina (površina koja je odziv u funkciji ulaznih faktora “ x_i ”).

U većini eksperimentalnih istraživanja procesa obrade odvajanjem čestica kao matematički modeli zadovoljavaju polinomi prvog stupnja [8]:

$$y = b_o + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i x_j \quad (16)$$

x_i = nezavisni utjecajni faktori; $i = 1, k$

U obradi odvajanjem čestica se, iz praktičnih razloga, često koristi matematički model zapisan u eksponencijalnom obliku:

$$y = C \prod_{i=1}^k x_i^{p_i} \quad (17)$$

x_i = nezavisni utjecajni faktori; $i = 1, k$

Ovaj model pripada u istu grupu kao i modeli polinoma prvog stupnja jer se jednostavno pretvara u njega matematičkom operacijom logaritmiranja.

Međutim u istraživanjima u kojima se očekuje funkcija odziva s ekstremom od značaja su polinomi drugog stupnja [8]:

$$y = b_o + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_i \sum_j b_{ij} x_i x_j \quad (18)$$

x_i = nezavisni utjecajni faktori; $i = 1, k$

Višefaktorski plan pokusa prvog stupnja primjenjuje se onda ako je za polazni matematički model izabran model prvog stupnja, prikazan formulama (16) ili (17). Istodobno, istraživač određuje koje nezavisne ulazne veličine procesa (x_i – slika

6.) proglašava važnim za konkretno istraživanje. Te nezavisne ulazne veličine procesa ulaze u matematički model, u kojem se sada zovu nezavisni utjecajni faktori (x_i).

U daljnjem koraku potrebno je odrediti razine variranja faktora. Najviše se primjenjuju ortogonalni planovi s variranjem faktora na dvije razine, što se označava:

$$X_{i,\max}$$

$$X_{i,\min}$$

Planovi čiji se faktori variraju na dvije razine nazivaju se planovi tipa " 2_k " gdje je " k " broj faktora, odnosno nezavisnih varijabli. To je dovoljno jer polinom prvog stupnja je linearna funkcija, pa su za njeno određivanje dovoljne dvije točke. Slijedeći korak je određivanje u kojoj točki plana i kako će se izvoditi ponavljanje. Najčešće se primjenjuje centralni plan eksperimenta koji podrazumijeva da se ponavljanje eksperimentalnih točaka izvodi samo u centralnoj točki višefaktorskog ortogonalnog plana. Ponavljanje je nužno kako bi se mogla odrediti greška eksperimenta i testiranje hipoteze. Zbog toga će se morati odrediti i srednje razine faktora prema izrazu:

$$X_{i,sr} = \frac{X_{i\min} + X_{i\max}}{2} \quad (19)$$

Vrlo često vrijednost faktora se prikazuju u kodiranom obliku, a iz razloga jednostavnijeg i preglednijeg prikaza. Kodiranje se izvodi na način:

$$X_{\min} \rightarrow \text{kod} = +1$$

$$X_{sr} \rightarrow \text{kod} = 0$$

$$X_{\max} \rightarrow \text{kod} = -1$$

Kada se sve rečeno zbroji proizlazi i ukupni broj eksperimentalnih točaka (N) koji se računa prema formuli:

$$N = 2^k + n \quad (20)$$

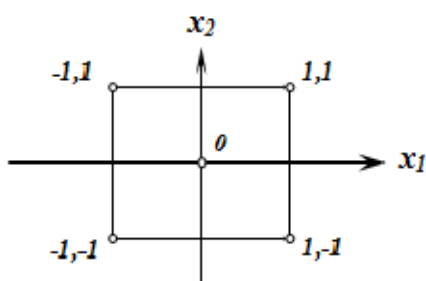
Tako je na primjer:

- kod eksperimenta sa tri nezavisna faktora ($k=3$), broj ponavljanja u središtu je četiri ($n=4$) i ukupni broj eksperimentalnih točaka je 12 ($N=12$),
- kod eksperimenta sa četiri nezavisna faktora ($k=4$), broj ponavljanja u središtu je šest ($n=6$) i ukupni broj eksperimentalnih točaka je 22 ($N=22$).

Sve do sada definirane veličine faktora (razine variranja) potrebno je upisati u za to odgovarajuću tablicu. Na kraju planiranja pokusa izrađuje se matrica plana pokusa po kojoj će biti izveden eksperiment (Tablica 1.). Raspored eksperimentalnih točaka u prostoru, a po kome se izrađuje matrica plana pokusa, može se prikazati grafički. Kao primjer, na slici 8. prikazuje se raspored eksperimentalnih točaka, u kodiranim koordinatama, za dva nezavisna faktora.

Tablica 1. Matrica plana pokusa " 2^k " (bez podataka za centar plana)

| | kod faktora | | | |
|-------|-------------|-------|-------|-------|
| | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 |
| 2^2 | 1 | -1 | -1 | -1 |
| | 2 | +1 | -1 | -1 |
| | 3 | -1 | +1 | -1 |
| | 4 | +1 | +1 | -1 |
| 2^3 | 5 | -1 | -1 | +1 |
| | 6 | +1 | -1 | +1 |
| | 7 | -1 | +1 | +1 |
| | 8 | +1 | +1 | +1 |
| 2^4 | 9 | -1 | -1 | -1 |
| | 10 | +1 | -1 | -1 |
| | 11 | -1 | +1 | -1 |
| | 12 | +1 | +1 | -1 |
| | 13 | -1 | -1 | +1 |
| | 14 | +1 | -1 | +1 |
| | 15 | -1 | +1 | +1 |
| | 16 | +1 | +1 | +1 |



Slika 8. Raspored eksperimentalnih točaka u planu pokusa " 2^2+2 "

Tablica 2. Matrica plan pokusa "2²+2"

| | kod faktora | |
|---|----------------|----------------|
| | X ₁ | X ₂ |
| 1 | -1 | -1 |
| 2 | +1 | -1 |
| 3 | -1 | +1 |
| 4 | +1 | +1 |
| 5 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 |

Višefaktorski plan pokusa drugog stupnja primjenjuje se onda ako je za polazni matematički model izabran model drugog stupnja, prikazan formulom (18). Nazivaju se još pokretni planovi, ili centralno kompozitni planovi drugog reda.

U prvom koraku istraživač određuje koje nezavisne ulazne veličine procesa (x_i – slika 6.) proglašava važnim za konkretno istraživanje. Te nezavisne ulazne veličine procesa ulaze u matematički model, u kojem se sada zovu nezavisni utjecajni faktori (x_i).

U daljnjem koraku potrebno je odrediti razine variranja faktora. Centralno kompozitni planovi drugog reda polaze od naročitog geometrijskog rasporeda eksperimentalnih točaka u eksperimentalnom prostoru, tako da su sve točke jednako udaljene od centra u kojem je također nekoliko točaka. Naime, kod plana pokusa prvog stupnja radi se o linearnom matematičkom modelu, a za njegovo definiranje dovoljne su dvije razine faktora. Međutim, ovdje se radi o paraboličnom matematičkom modelu za određivanje kojeg su potrebne barem tri točke. Ipak, teži se jednostavnosti, pa je protokol za određivanje razina maksimalne i minimalne vrijednosti faktora, te onih u centru plana pokusa identičan kao za plan pokusa prvog reda:

$$x_{i,sr} = \frac{x_{i,min} + x_{i,max}}{2} \quad (21)$$

Dodatne točke u planu pokusa su razine faktora " $\pm x_{i,\alpha}$ " i sa vrijednostima faktora u centru plana čine te neophodne tri točke koje služe za definiciju parabolične funkcije. One se postavljaju na središnje koordinatne osi, odnosno koordinatne osi koje prolaze kroz centar plana, i računaju se kako slijedi [8]:

$$I_i = \frac{x_{i,max} - x_{i,sr}}{2} \text{ (interval variranja faktora)} \quad (22)$$

$$\pm x_{i,\alpha} = x_{i,sr} \pm \alpha \cdot l_i \rightarrow \text{kod } \pm \alpha$$

$$\alpha = (2^k)^{1/4}$$

Kada se sve rečeno zbroji proizlazi i ukupni broj eksperimentalnih točaka (N) koji se računa prema formuli:

$$N = 2^k + 2k + n \quad (23)$$

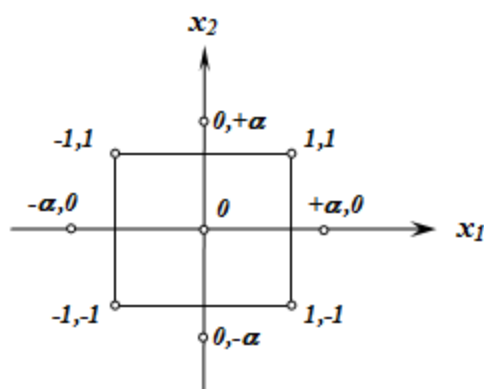
Broj točaka u centru plana pokusa je kako slijedi:

$$\text{za } k = 2 - n = 5$$

$$k = 3 - n = 6$$

$$k = 4 - n = 7$$

Sve do sada definirane veličine faktora (razine variranja) potrebno je upisati u za to odgovarajuću tablicu. Na kraju planiranja pokusa izrađuje se matrica plana pokusa po kojoj će biti izveden eksperiment. Raspored eksperimentalnih točaka u prostoru, a po kome se izrađuje matrica plana pokusa, može se prikazati grafički. Kao primjer, na slici 9. prikazuje se raspored eksperimentalnih točaka, u kodiranim koordinatama, za dva nezavisna faktora. U Tablici 3. prikazuje se matrica plana pokusa za dva nezavisna faktora.



Slika 9. Raspored eksperimentalnih točaka u planu pokusa "2²+2-2+5"

Tablica 3. Matrica plan pokusa " $2^2+2\cdot 2+5$ "

| | kod faktora | |
|----|-------------|-----------|
| | X_1 | X_2 |
| 1 | -1 | -1 |
| 2 | +1 | -1 |
| 3 | -1 | +1 |
| 4 | +1 | +1 |
| 5 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 |
| 10 | $-\alpha$ | 0 |
| 11 | $+\alpha$ | 0 |
| 12 | 0 | $-\alpha$ |
| 13 | 0 | $+\alpha$ |

2.4. Utjecajni faktori na obradivost

2.4.1. Obradivost čelika u ovisnosti o sadržaju ugljika

Na svojstva čelika utječe ponajprije maseni udio ugljika. Ugljik je osnovni i najutjecajniji element u čelicima i time ima najveći utjecaj na obradivost. Na primjeru nelegiranih kvalitetnih čelika (ugličnih čelika) i niskolegiranih čelika (sa sadržajem legiranih elemenata $< 5\%$) objašnjava se utjecaj sadržaja ugljika na obradivost koji je odgovoran za stvaranje strukture, a time i za tvrdoću i vlačnu čvrstoću ovih čelika.

Osnovni dijelovi strukture tog čelika su [9]:

- ferit (α - željezo)
- cementit (Fe_3C)
- perlit ($\alpha^{id} + Fe_3C^{id}$)

Ferit se odlikuje niskom tvrdoćom i čvrstoćom a tako i visokom sposobnošću oblikovanja deformiranjem. Stuktura cementita je tvrda i krhka i praktično se ne da

obrađivati. U ovisnosti o sadržaju ugljika u čeliku, cementit se može pojaviti samostalno ili rastvoren u perlitu. Perlit je eutektoidna smjesa ferita i cementita [9].

Porastom udjela ugljika kod nelegiranih čelika do eutektoidnog udjela ($< 0,8\% \text{ C}$) raste tvrdoća, granica razvlačenja i vlačna čvrstoća, ali se smanjuje istezljivost, suženje poprečnog presjeka i udarna radnja loma. Razlog tome je povišenje udjela tvrdog i krhkog cementita u mikrostrukturi s porastom masenog udjela ugljika.

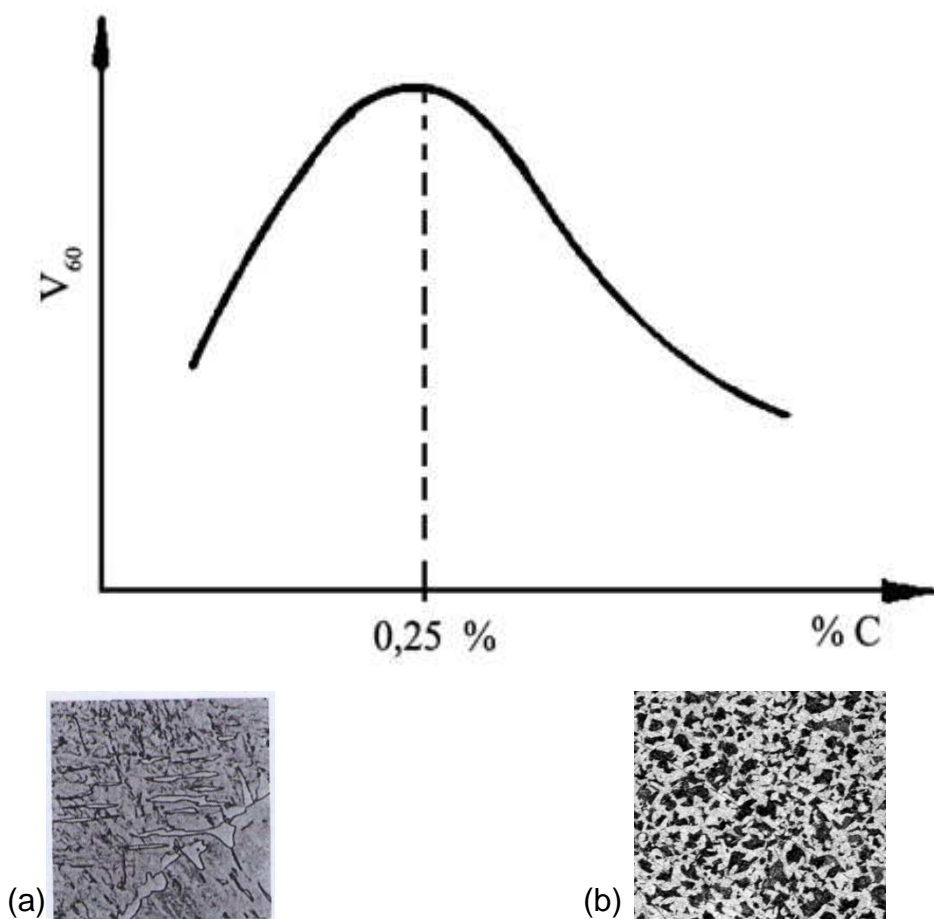
Kod nadeutektoidnih čelika čvrstoća opada jer je povišen udio sekundarnog cementita koji se obično mrežasto izlučuje po granicama zrna.

S porastom masenog udjela ugljika opada sposobnost čelika za plastičnu deformaciju i zavarljivost, a raste zakaljivost. Zbog navedenih razloga većina konstrukcijskih čelika sadrži manje od $0,6\% \text{ C}$.

Niskougljični čelici obično imaju najbolju obradivost od ugljičnih čelika. U žarenom ili valjanom stanju, obradivost je obično najbolja za čelike sa udjelom ugljika između $0,15$ i $0,25\%$. Iz slike 10. možemo uočiti da svojstvo obradivosti čelika s vrlo malim postotkom ugljika (manjim od $0,25\%$) je prikazano kroz obilježja slobodnog ferita. Posebne se poteškoće stvaraju, kod čelika s sadržajem ugljika $\text{C} < 0,25\%$, kod brušenja i odrezivanja kao i kod bušenja, razvrtavanja i narezivanja navoja. Na temelju visoke sposobnosti oblikovanja deformiranjem kod prije navedenih postupaka i pri niskim brzinama rezanja, dolazi do loše kvalitete obrađene površine. Kod nižih razina ugljika, materijal je kovkiji i prijanja uz alat, čime otežava lomljenje odvojene čestice što rezultira stvaranjem naljepaka, te ima jako izraženu sklonost trakastoj strukturi odvojene čestice. Kod čelika s sadržajem ugljika od $0,10$ do $0,35\% \text{ C}$ može se kroz visoku temperaturu austenitizacije, dugo držanje na toj temperaturi i brzo hlađenje proizvesti tzv. Widmannstättenova struktura. Tako nastaje igličasti ferit s fino podijeljenim lamelarnim cementitom. Takva struktura odlikuje se dobrim oblikom odvojenih čestica ali ima vrlo loša mehanička svojstva. Povrh toga, kako su ovi materijali često proizvedeni iz starog željeza, mogu tijekom vremena kod masovne proizvodnje pokazivati značajne varijacije osim ako se kroz pažljivo ispitivanje ne osigura dosljednost dolaznog materijala.

Iz tog razloga teži se dobivanju sitnog zrna jer se time povećavaju mehanička svojstva, a materijal ima bolju obradivost. Deformiranje u hladnom stanju smanjuje kovkost i obično povećava obradivost. Posebno je efikasno u eliminiranju problema lomljenja odvojene čestice i BUE formacija. Ako se obrati pozornost na desnu stranu krivulje onda se uočava da se tamo nalaze čelici sa višim postotkom

ugljika time i većim postotkom perlita, a poznato je da se s porastom udjela ugljika povećava tvrdoća i čvrstoća što smanjuje obradivost [1] [10].



Slika 10. Ovisnost obradivosti o sadržaju ugljika kod nelegiranih čelika
(a) Widmannstättenova struktura (b) Grubožrnata struktura [2] [9]

Čelici sa srednjim sadržajem ugljika (s sadržajem ugljika između 0.4% i 0.8%) smatraju se, samo u odnosu na stvaranje odvojene čestice i kvalitetu obrađene površine, dobro obradivim. Oni su čvršći od niskougljičnih čelika i imaju veće sile rezanja pod istovjetnim uvjetima ali isto sadrže veći udio tvrdih faza, posebice cementit, koji ubrzava abrazivno trošenje alata. Žarenje i normalizacija čelika sa srednjim sadržajem ugljika postiže grubožrnatu strukturu perlita i poboljšava obradivost. Čelici sa srednjim sadržajem ugljika su čvršći od niskougljičnih čelika, imaju veće sile rezanja pod istovjetnim uvjetima, i manje su podložni poteškoćama kod lomljenja odvojene čestice i nastajanju BUE formacija od niskougljičnih čelika.

Kod nadeutektoidnih ugljičnih čelika ($C > 0,8 \%$), sporim hlađenjem na zraku stvara se ferit i cementit. U suprotnom kod podeutektoidnih ugljičnih čelika, slobodni ferit ne stvara svoje mreže već je rastvoren u perlitu. Perlit se stvara direktno na granici zrna austenita. Visokouglični čelici sadrže veći udio tvrdih faza (npr., cementit) od čelika sa srednjim sadržajem ugljika i stoga proizvode veće sile rezanja, temperature, razine abrazivnog trošenja alata. Rezultat toga je da se obrađuju nižim brzinama rezanja i manjim posmacima. Kao kod čelika sa srednjim sadržajem ugljika, dopuštena brzina rezanja za prihvatljivi vijek trajanja alat se smanjuje sa povećanjem udjela ugljika.

Serije čelika u valjanom ili zrakom hlađenom stanju koje sadrže više od $0,8 \%$ ugljika imaju višak cementita u matrici i osobito se teško obrađuju. Žarenje nastoji objediniti cementiti u veće čestice i u pravilu poboljšava obradivost. Sferoditna mikrostruktura isto poboljšava karakteristike obrade visokougličnih čelika. Slaganje karbida u sferodit poboljšava rezanje i smanjuje trošenje alata. Gruba sferoidalna ili perlitna struktura pruža bolju obradivost od sitne strukture. Visokouglični čelik je sklon kaljenju na sobnoj temperaturi, tako da se javljaju problemi sa integritetom površine, kao što su zaostala naprezanja i formiranje tvrdog bijelog sloja, ako je volumen sredstva za hlađenje nedovoljan ili neredovit. Visokouglični čelici u pravilu imaju malo problema sa odvojenom česticom i nisu skloni stvaranju BUE formacija. Kaljeni visokouglični čelici sadrže abrazivne martenzitne i bainitne faze i oni su koji se od ugljičnih čelika najteže obrađuju. Pored toga, u određenim uvjetima su skloni formiranju tvrdog bijelog sloja. Kada je potrebno kaljenje, čelici bi se prije kaljenja trebali grubo obraditi, i završno tokariti ili glodati na konačnu dimenziju nakon kaljenja.

Kod sadržaja ugljika znatno preko $0,8 \%$, slobodni cementit se izlučuje na granicama zrna austenita, odnosno zrna perlita. Takvi čelici izazivaju vrlo veliko trošenje alata kod procesa obrade odvajanjem čestica. Pored jakog abrazivnog djelovanja tvrdih i krhkih dijelova strukture, uzrokuje se stvaranje visokog pritiska i temperature a time i dodatnog opterećenja rezanja. Da bi se povećala obradivost čelika s visokim postotkom ugljika teži se dobivanju grubog zrna [1] [2] [9] [10].

2.4.2. Utjecaj legirnih elemenata i primjese na obradivost

Legirni elementi i prateće primjese mogu utjecati na obradivost kroz promjenu strukture ili stvaranjem raznih uključina. U sljedećem je opisan utjecaj nekih legirnih elemenata i pratećih primjese na obradivost materijala [1] [9]:

Mangan kod čelika poboljšava prokaljivost i povišuje granicu razvlačenja (100 N/mm^2 za svaki 1 % legiranih elemenata). Sadržaj Mn do 1,5 %, kod čelika s niskim sadržajem ugljika, povoljno utječe na obradivost s obzirom na stvaranje odvojene čestice. Kod čelika s visokim sadržajem ugljika negativno utječe na obradivost što se iskazuje kroz visoku istrošenost alata.

Dodatak do 0,2 % mangana lijevanim legurama aluminija produljuje vijek trajanja alata.

Krom je jak karbidotvorac i tvori tvrđe karbide od cementita. Karbidi povišuju otpornost na pritisak i otpornost na abrazijsko trošenje. Udarni rad loma čelika legiranih sa kromom je niži nego kod ostalih čelika jednake razine čvrstoće. Legiranje kromom utječe na sklonost krhkosti nakon popuštanja, koja se može izbjeći legiranjem s molibdenom. Krom u čeliku djeluje na smanjenje toplinske vodljivosti i toplinske rastezljivosti.

Molibden se može dodati nekim vrstama nehrđajućih čelika da im se poboljša otpornost na koroziju ili zavarljivost i radi povećanja otpornosti na naprezanje.

Nikal povećava čvrstoću čeličnih materijala, a smanjuje toplinsku vodljivost i toplinsku rastezljivost čelika. Nikal utječe na povećanje žilavosti posebno pri niskim temperaturama. To generalno vodi k nepovoljnoj obradivosti.

Silicij sa kisikom tvori spoj SiO_2 koji povećava tvrdoću, elastičnost i krhkost, što je izrazito nepogodno za obradivost jer uzrokuje naglo trošenje alata. Pri toplinskoj obradi čelici legirani sa Si pokazuju sklonost razugličenju površine, a pri cementiranju silicij otežava difuziju ugljika u čelik. Silicij povišuje dinamičku izdržljivost kod čelika i blago povećava prokaljivost čelika.

Fosfor je uglavnom nepoželjna primjesa, ali kod sastava do 0.1 %, fosfor iskazuje povoljne posljedice na obradivost čelika. Visok sadržaj fosfora uzrokuje povišenje tvrdoće čelika što dovodi do poboljšanja kvalitete obrađene površine, međutim vodi i k pojačanoj istrošenosti alata.

Dušik je uglavnom nepoželjna primjesa s masenim udjelom od 0,01 do 0,03 %. Već 0,01 % dušika povišuje granicu razvlačenja i čvrstoću, ali jako smanjuje deformabilnost i naročito udarni rad loma. Zbog tih razloga je maseni udio dušika dobra mjera za kvalitetu čelika.

Titan već u malim količinama kod čelika može uzrokovati znatan porast čvrstoće na temelju fine raspodjele karbida. Njegovi se karbidi teško raspadaju pri povišenim temperaturama. Titan usitnjuje zрно i smanjuje opasnost od pregrijavanja. Titan se može dodati nekim vrstama nehrđajućih čelika da im se poboljša otpornost na koroziju ili zavarljivost.

Vanadij je jak karbidotvorac i na taj način povisuje tvrdoću i otpornost na trošenje čelika pri normalnim i povišenim temperaturama. Usporava rast zrna pri povišenim temperaturama. Povisuje granicu razvlačenja pa je prisutan i kod čelika za opruge.

Sumpor posjeduje male mogućnosti izdvajanja u željezu, ali zato u čeliku kao legirni element gradi različite stabilne sulfide. Željezni sulfidi (FeS) su nepoželjni. Poželjni su mangan sulfidi (MnS) koji imaju visoku točku taljenja. Pozitivno djelovanje MnS na obradivost leži u nasječenim odvojenim česticama, boljim obrađenim površinama i maloj sklonosti stvaranju naljepka. S povećanjem udjela MnS, stvara se negativan utjecaj na mehaničke karakteristike.

Kod tokarenja, glodanja i bušenja, sumpor od 0,06 do 0,1 % u čeliku za poboljšavanje, izaziva poboljšanje obradivosti.

Sumpor se dodaje i nekim vrstama legura bakra da bi im se poboljšala karakteristika odvojene čestice i obradivost.

Olovo nije u osnovi željeza, ono leži u obliku podmikroskopskih uključina. Na temelju niske točke taljenja, gradi se zaštitni olovni sloj između alata i obradka i smanjuje istrošenost alata. Specifične sile rezanja mogu se smanjiti i do 50 %. Odvojene čestice su lomljenog oblika.

Olovom legirane legure bakra se smatraju lako obradivim materijalom.

Volfram je jak karbidotvorac, a karbidi su mu vrlo tvrdi i toplinski postojani. Legiranje čelika volframom omogućuje povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, a u manjoj mjeri i žilavosti. Djeluje povoljno na čvrstoću i otpornost na trošenje u toplom stanju te sprječava porast zrna pri povišenim temperaturama.

Bakar legiran aluminiju povećava tvrdoću leguri, poboljšava kvalitetu obrađene površine i smanjuje tendenciju legure da se naljepljuje na rub reznog alata.

Dodavanje bakra sivom ili nodularnom željeznom lijevu rezultira povećanjem obradivosti.

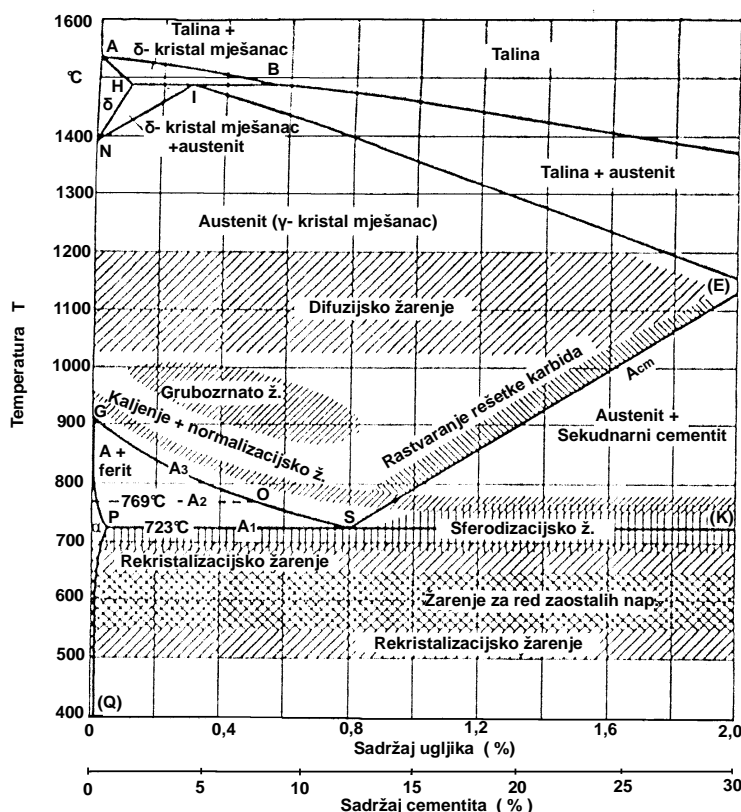
Magnezij legiran aluminiju očvršćuje njegovu matricu, tj. osnovu legure, i čineći to, smanjuje koeficijent trenja između alata i obradka, a rezultat je kraća i uža odvojena čestica i uz to magnezij pruža bolju kvalitetu obrađene površine.

Bizmut se dodaje legurama aluminija koje sadrže silicij i magnezij da bi im se poboljšala obradivost.

Telurij se dodaje nekim vrstama legura bakra da bi im se poboljšala karakteristika odvojene čestice i obradivost.

2.4.3. Obradivost u ovisnosti o toplinskoj obradi

Provedenom toplinskom obradom mogu se postići zahtijevana mehanička svojstva i obradivost ciljanom promjenom veličine, oblika i udjela mikrostrukturnih faza [9]. Pod pojmom toplinska obrada podrazumijeva se postupak, u kojem se obradak ili područje obradka, namjerno podvrgava temperaturno – vremenskim ciklusima i / ili dodatnim fizičkim i kemijskim reakcijama, da bi se postigla željena svojstva i mikrostruktura. Područje temperature različitih toplinskih obrada pokazuje slika 11.



Slika 11. Dio dijagrama željezo – ugljik s područjima toplinske obrade [9]

Postupci toplinske obradbe [2] [9] [11] [12]:

Difuzijsko (homogenizacijsko) žarenje se upotrebljava prvenstveno nakon obrade u toplom stanju (lijevanje, obrada deformiranjem) kako bi se dobila jednolična raspodjela segregacija.

Normalizacijsko žarenje se provodi s glavnom svrhom postignuća sitnozrnate i jednolične mikrostrukture. Ovim postupkom smanjuje se trajnost oštice alata, ali je obrađena površina kvalitetnija. Duljim zadržavanjem na temperaturi

normalizacije može se dobiti krupnozrnata struktura a time i niža mehanička svojstva.

Žarenje na grubo zrno primjenjuje se kod podeutektoidnih čelika sa sadržajem ugljika od 0,3 do 0,4% (feritno-perlitni čelik), kako bi se postigla grubozrnata feritno – perlitna struktura sa što je više moguće zatvorenom mrežom feritnih zrna. Trošenje alata kod obrade takve strukture je relativno nisko, a stvaranje odvojene čestice je u pravilu dobro.

Sferodizacijsko žarenje primjenjuje se da bi se lamelarni i mrežasti karbidi preoblikovali u kuglasti oblik. Takva struktura je mekana i da se dobro deformirati. Obradivost takvih struktura je, u odnosu na učinak trošenja, povoljnija, dok se stvaranje odvojenih čestica pogoršava zbog dijela ferita koji prevladava u strukturi.

Rekristalizacijsko žarenje se provodi nakon hladnog oblikovanja u svrhu postignuća ponovnih poligonalnih kristalnih zrna. Rekristalizacija vraća čeliku kovkost, koja se pri hladnom deformiranju smanjila.

Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja provodi se za čelike pri temperaturama od 550 do 650 °C u svrhu razgradnje z aostalih naprezanja nastalih bilo tijekom deformiranja ili pri obradbi odvajanjem čestica ili pri prebrzom ohlađivanju nakon žarenja. Pri tome ne dolazi do bitnih promjena mehaničkih svojstava strojnih dijelova niti do strukturnih promjena.

Kaljenje je toplinska obradba pri kojoj se čelik ugrijava na dovoljno visoku temperaturu radi austenitizacije i brzo hladi da bi se postigla veća tvrdoća i čvrstoća. Nakon kaljenja potrebno je provesti popuštanje da bi se uklonila zaostala naprezanja i postiglo povećanje mehaničkih svojstava.

Popuštanje se provodi u svrhu povišenja žilavosti martenzita postignutog kaljenjem, sniženja vlastitih zaostalih naprezanja martenzita, i postizanja dimenzijske postojanosti. Popuštanjem se redovito i snizuje tvrdoća postignuta kaljenjem, no to sniženje nikako nije cilj, nego samo nužna posljedica popuštanja.

Poboljšavanje se sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja (temperatura popuštanja iznad 400°C) s glavnom svrhom postizanja visoke granice tečenja i visoke žilavosti. Poboljšavaju se samo podeutektoidni čelici s 0.3-0.6 % C.

Cementiranje je postupak obrade koji se sastoji od pougličanja (obogaćivanje površinskih slojeva proizvoda ugljikom) i kaljenja pougličanog proizvoda te niskotemperaturnog popuštanja. Osnovni je cilj cementiranja postizanje tvrdih površinskih slojeva strojnog dijela otpornih na trošenje, a da pri tom jezgra

strojnog dijela postigne što veću otpornost na udarna opterećenja (žilavost). Cementiranje značajno smanjuje obradivost.

Nitriranjem nastaje tanki sloj nitrida (kemijski spojevi željeza i dušika) koji je otporan na adhezijsko trošenje. Nitriranje bitno smanjuje obradivost.

Karbonitriranje i nitrokarburiranje je postupak obogaćivanja površinskih slojeva istodobno sa ugljikom i dušikom. Ovisno o temperaturi postižu se svojstva koja su slična onima kod cementiranja, odnosno, nitriranja.

Boriranje je postupak obogaćivanja površinskih slojeva borom. Borirani proizvod će dobiti visoku tvrdoću i visoku otpornost na abrazijsko trošenje.

2.4.4. Obradivost u ovisnosti o strukturi

Ferit posjeduje nisku čvrstoću i tvrdoću, te visoku sposobnost preoblikovanja. Ferit ima sklonost stvaranju naljepaka, tvori nepovoljan oblik odvojene čestice što rezultira lošom kvalitetom obrađene površine [13].

Perlit ima relativno mekanu strukturu – što je razmak između lamela veći to je materijal mekaniji. Fini perlit nastaje izotermalnom transformacijom pri niskim temperaturama i ima veću tvrdoću i žilavost nego grubi perlit [10]. Perlitna struktura promiče stvaranje naljepaka u području nižih brzina, povećava opterećenje i temperaturu u kontaktnoj zoni, povećava trošenje alata s porastom brzine, poboljšava kvalitetu obrađene površine i oblik odvojene čestice [13].

Austenit je kruta otopina ugljika u γ -željezu. Nastaje pri ugrijavanju čelika pri temperaturi A_1 tj. Kod pretvorbe perlita u austenit. Austenitni čelici imaju velike poteškoće kod obradivosti. Oni se često obrađuju u gašenom ili u rastvorno (homogenizacijom) žarenom stanju. Pri tome im je karakteristično visoka sklonost lijepljenju čestica, stvaranje kratera na alatu kao i sklonost k hladnom deformacijskom očvršnuću. Austenit je pri svim temperaturama paramagnetičan.

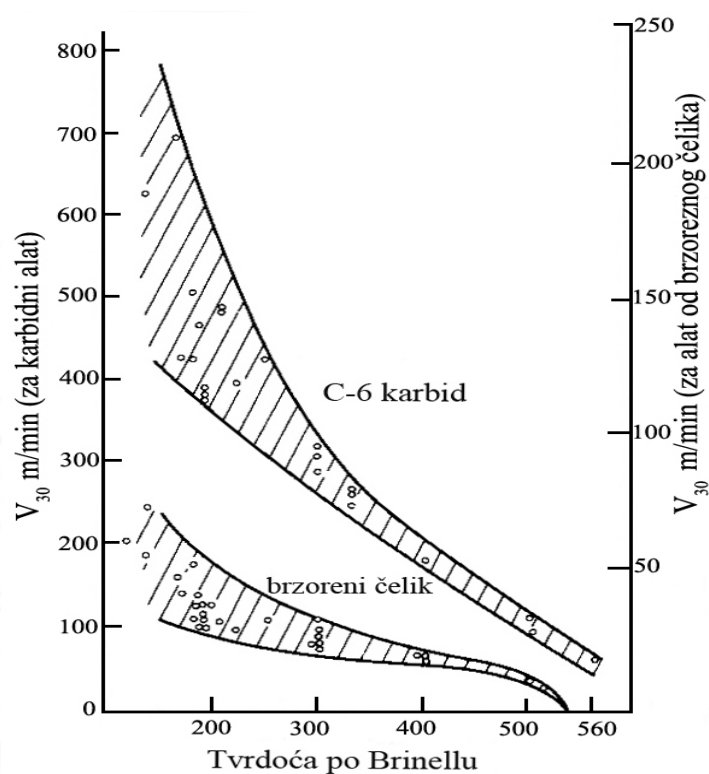
Martenzit ima tetragonalnu rešetku nastalu preklapanjem austenitne FCC-rešetke i zadržavanjem atoma ugljika u prisilnoj čvrstoj otopini. Martenzit ima visoku čvrstoću zahvaljujući tetragonalnoj distorziji rešetke α -željeza (transformacija BCC u BCT rešetku) uslijed intersticijskog ulaza atoma ugljika, ali i zbog povećanja gustoće dislokacija izvitoperenjem kristalne rešetke (očvršnuće umnažanjem dislokacija, linijskih zapreka). Martenzitnom transformacijom povisuje se tvrdoća i čvrstoća, ali pada istezljivost i žilavost pa je nužno dodatno provesti popuštanje. Kod niskih temperatura popuštanja, ugljik se izlučuje iz martenzita što snižava zaostala naprezanja i povećava žilavost. Takva popuštena struktura s popuštenim martenzitom bolje se obrađuje.

Widmannstättenova struktura se sastoji od igličastog ferita s fino podijeljenim lamelarnim cementitom. Takva struktura odlikuje se dobrim oblikom odvojenih čestica, ali ima vrlo loša mehanička svojstva.

2.4.5. Obradivost u ovisnosti o mehaničkim svojstvima

Tvrđi, krhki materijali se uglavnom teže obrađuju od mekih, duktilnih, ali materijali koji imaju visoku duktilnost teže stvaranju nepovoljnog oblika odvojene čestice.

Vrlo važnu ulogu u pogledu tvrdoće imaju karbidi. Osnovna su svojstva karbida visoka tvrdoća i visoka krhkost. Ovo posljednje (negativno) svojstvo dolazi tim manje do izražaja što su čestice karbida sitnije i što im je stupanj disperzije viši [10].



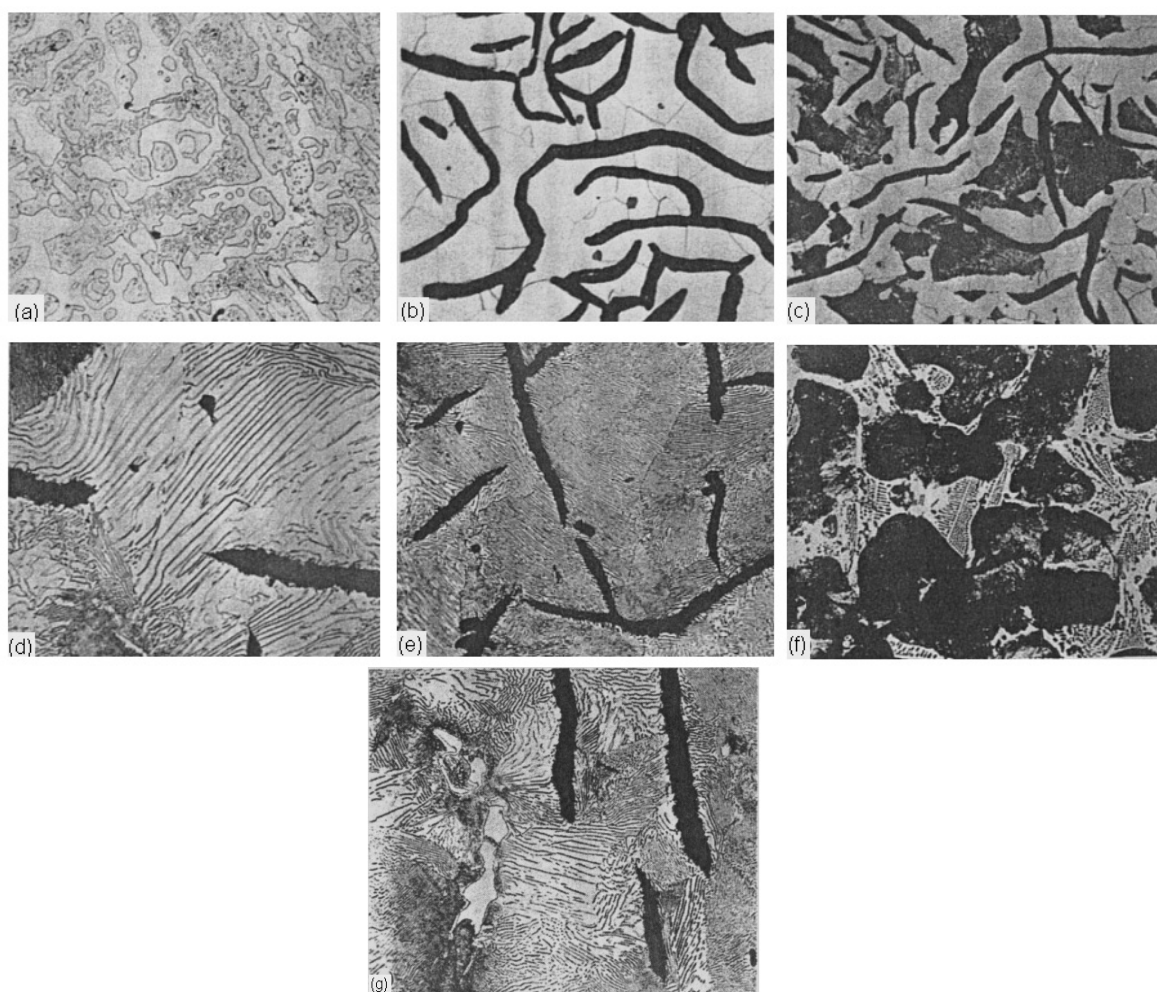
Slika 12. Ovisnost tvrdoće o brzini rezanja za vijek trajanja alata od 30 min [10]

Slika 12. prikazuje ovisnost brzine V_{30} (brzina rezanja u m/min za vijek trajanja od 30 min) o tvrdoći za tokarske alate od wolframova karbida i tokarske alate od brzoreznog čelika. Iz dijagrama se vidi da vijek trajanja alata osim brzine rezanja ovisi i o tvrdoći.

2.5. Obradivost materijala za strojogradnju

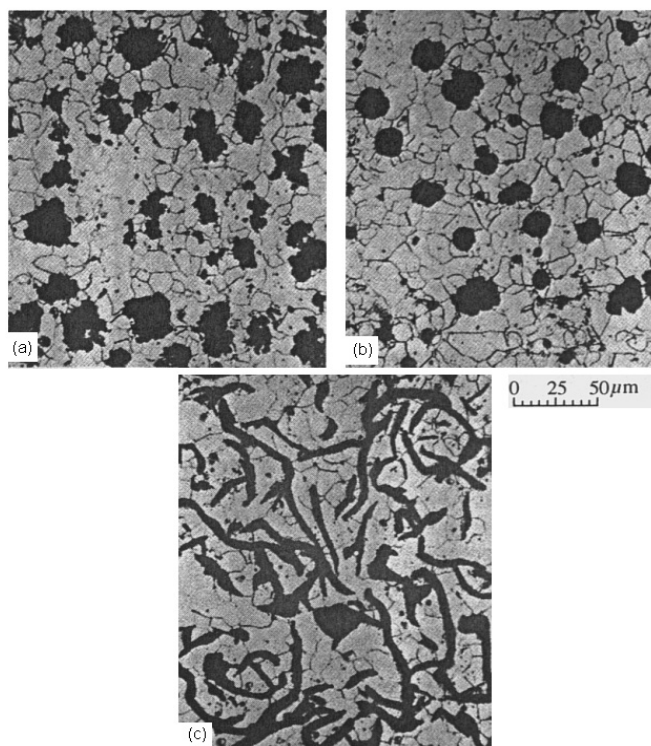
2.5.1. Željezni ljevovi

Legure željeza koje sadrže od 2 – 4 % ugljika pripisuju se željeznim ljevovima. Kao i kod čelika postoje mnoge karakteristične strukture (slika 13.). Željezni ljevovi se često koriste u proizvodnji motora s unutarnjim izgaranjem i alatnih strojeva. Za te primjene u širokoj upotrebi su tri osnovne vrste željeznih ljevova: sivi lijev, temper (kovkasti) lijev i nodularni (žilavi) lijev. Druga dva oblika, bijeli lijev i vermikularni lijev, se isto mogu susresti ali su manje uobičajeni [1].



Slika 13. Struktura željeznih ljevova (a) Bijeli lijev (perlit + Fe_3C), H_B 550. (b) Sivi lijev (listići grafita u feritnoj željeznoj osnovi), H_B 120. (c) Sivi lijev (grafit u feritno-perlitnoj željeznoj osnovi), H_B 150. (d) Sivi lijev (grafit u gruboj perlitnoj željeznoj osnovi), H_B 195. (e) Sivi lijev (grafit u finoj perlitnoj željeznoj osnovi), H_B 215. (f) Sivi lijev (grafit u perlitno-steaditnoj željeznoj osnovi), H_B 200. (g) Sivi lijev (grafit u perlitno- karbidnoj osnovi), H_B 240. [10]

Slika 14. Prikazuje tipičnu strukturu triju osnovnih vrsta željeznih ljevova.



Slika 14. Tipična struktura triju željeznih ljevova (a) Crni temper (kovkasti) lijev (3.1 % C, 2.39 % Si, 0.37 % Mn), HB 150. (b) Nodularni (žilavi) lijev (3.1 % C, 2.41 % Si, 0.43 % Mn), HB 150. (c) Sivi željezni lijev (3.2 % C, 2.43 % Si, 0.32 % Mn), HB 105. [10]

Sivi željezni lijev se često primarno sastoji od perlita (u pravilu 85 % jezgre) i ferita, iako isto postoje vrste koje se sastoje primarno od ferita, većina vrsta sadrži i nešto steadita ili austenita. Sivi lijev sadrži 3 do 5 % grafita u obliku listića ili lamela. Listićavi grafit smanjuje kovkost, olakšava lomljenje odvojene čestice, i djeluje kao prirodno unutarnje mazivo. Stoga sivi lijev s obzirom na njegovu tvrdoću ima relativno male sile rezanja i formira kratku, lako lomljivu odvojenu česticu. Njegova ograničena kovkost smanjuje i dužinu kontakta između alata i odvojene čestice i ograničava maksimalne temperature rezanja. Zbog tih svojstava, obično se označuje kao lako obradiv materijal. Zbog dobre obradivosti, male cijene, i znatnog unutarnje prigušenja, često se koristi kod blokova i glave motora i drugih dijelova automobila. Odljevci sivog lijeva se često koriste kod masovne proizvodnje.

Za nepromjenjivi kemijski sastav, životni vijek alata je čvrsto povezan sa čvrstoćom odljevka, koja ovisi o brzini hlađenja i metalurškom stanju. Čvrstoća odljevka se povećava ubrzanjem hlađenja. Žarenje odljevaka prije obrade može značajno povećati vijek trajanja alata i obradivost.

Drugi problemi koji se susreću kod obradivosti sivog lijeva su često povezani s jednim od dva uzroka: tvrde uključine koje su se formirale tijekom skrućivanja, i spajanje ili zarobljavanje pijeska u odljevku. Ove pojave su u pravilu rezultat loše vođenog postupka lijevanja i najlakše se eliminiraju promjenama u postupcima lijevaonice. Tvrde uključine uključuju faze karbida željeza i martenzitne uključine.

Utjecaj na obradivost sivog lijeva imaju i legirni elementi, iako je njihov utjecaj manje naglašen od onog koji ima čvrstoća odljevka. Dodavanjem bakra ili kositra željezu rezultira povećanjem obradivosti jer se obično usitnjuje perlitna struktura i smanjuje formiranje karbida. Dodavanjem kroma ili nikla odljevku da bi mu se povećala otpornost abrazivnom trošenju (npr., kod cilindara blokova motora) povećava čvrstoću odljevka i abrazivno trošenje alata. Dodavanje fosfora u koncentracijama od otprilike 0,15 % dovodi do stvaranja formacija steadita, koje povećavaju brzinu abrazivnog trošenja i smanjuju obradivost.

Sivi lijev je poznat kao "prljav" materijal za obrađivati. Visokobrzinska obrada željeza kod masovne proizvodnje može dovesti do nagomilavanja prašine, koje se sastoji uglavnom od grafita. Grafitna prašina ima negativan utjecaj na vijek trajanja stroja i u nekim slučajevima prašina može sadržavati čestice legirnih elemenata kao što su krom koji reagira sa sredstvom za podmazivanje i formira abrazivne okside koji ubrzavaju trošenje ležajeva i vodicica vretena. Redovito čišćenje strojeva i korištenje sredstva za hlađenje (kada to dopušta materijal alata) smanjuje širenje prašine i učinkovito je kod smanjivanja kvarova na strojevima koji zbog toga nastaju. Obradivost perlitnog sivog lijeva se obično poboljšava usitnjavanjem perlitne strukture, iako legirni elementi koji se zbog toga dodaju mogu suzbiti to djelovanje. Feritni sivi lijev je uglavnom mekši i lakše se obrađuje nego perlit, iako može biti podložan stvaranju naljepaka. Slobodan ferit može također reagirati sa vezivom kod alata od kubnog nitrid bora čime znatno smanjuje vijek trajanja alata. Steaditne i austenitne faze povećavaju čvrstoću što dovodi do većeg abrazivnog trošenja i manje obradivosti.

Sivi lijev se može obrađivati tvrdim metalom sa prevlakom ili bez nje, oksidnom ili nitridnom keramikom, ili alatima od kubnog nitrid bora. Završna obrada se također može obaviti tokarenjem pomoću cermeta. Prevučeni tvrdi metal se može koristiti za tokarenje i glodanje kod brzina do 150 m/min. Kod alata od tvrdog metala se obično koriste sredstva za hlađenje da bi se smanjilo širenje prašine. Sa alatima od tvrdog metala može se postići životni vijek alata na razini od 1000 ili 2000 obradka. Keramički alati sa silicijskom nitridnom bazom se koriste kod tokarenja, glodanja, dubljenja sa brzinama između 800 i 1300 m/min. Alati sa silicijskom nitridnom bazom se koriste bez sredstva za hlađenje da bi se spriječilo lomljenje alata zbog toplinskog udara. Da bi spriječilo krzanje alata obično se rubovi nakose,

pogotovo kod isprekidanih operacija. Životni vijek alata između 2000 i 10 000 obradka se može postići sa keramičkim alatima sa silicijskom nitridnom bazom. Alati od kubnog nitrid bora se posebno koriste kod glodanja i završnog dubljenja sa brzinama sličnima onim kod alata sa silicijskom nitridnom bazom.

Sivi željezni lijev inače pokazuje najbolje rezultate kada je podvrgnut postupku odvajanja čestica bez upotrebe SHIP-a. Ako se primjenjuje neka vrsta sredstva za hlađenje važno je da bude bez dodatka ulja. Čini se da uljni film sprječava širenje grafita preko čela iskošenja, a grafit djeluje kao kombinacija čvrstog maziva i barijere širenju ugljika od alata do odvojene čestice. Sivi željezni lijev pokazuje izrazito dobre rezultate sa keramičkim (Al_2O_3) reznim alatom korištenim bez sredstva za hlađenje [1] [10].

Sredstva za hlađenje se obično koriste kako bi se spriječilo širenje prašine i toplinska ekspanzija obradka ali nisu potrebne za postizanje prihvatljivog vijeka trajanja alata. Životni vijek alata od preko 10 000 obradka (često do 50 000 obradka) se može postići sa alatima od kubnog nitrid bora. Sa svim ovim alatnim materijalima se kod operacija tokarenja, glodanja i dubljenja koristi rezna geometrija sa negativnim prednjim kutem. Sivi lijev se može bušiti koristeći brzorezni čelik, brzorezni čelik legiran kobaltom, ili svrdlima od tvrdog metala. Za brzorezna svrdla, obično se brzina rezanja održava ispod 25 m/min da bi se osigurao odgovarajući vijek trajanja alata (iznad 1000 obradka). Radi postizanje duljeg vijeka trajanja alata (često iznad 30 000 obradka kod brzina rezanja od 80 m/min) i bolje kvalitete obrađenog povrta mogu se koristiti svrdla od sitnozrnatog karbida sa dostavom sredstva za hlađenje kroz svrdlo [1].

Temper (kovkasti) lijev, poznat kao ARMA čelik, je više istezljiv od sivog lijeva i uglavnom se teže obrađuje. Postiže dulje vrijeme kontakta između odvojene čestice i alata i veće temperature rezanja. Mnogo informacija koje se odnose na obradivost nodularnog lijeva se u općem smislu mogu primijeniti na temper lijev. Često citirano opće pravilo je da kovkasti lijev ima 25% dulji životni vijek alata nego lako obradivi čelik pod usporedivim uvjetima. Tradicionalno, kovkasti lijev se obrađuje sa prevučenim alatima od tvrdog metala. Obično se koristi prevlaka od crnog željeznog oksida jer povećava otpornost na abrazivno trošenje. Keramički alati sa silicijskom nitridnom bazom se tradicionalno ne koriste kod temper lijeva zato što temperature rezanja premašuju temperaturu taljenja staklaste faze u vezivu tih alata. Međutim, nedavno razvijene prevučene serije sa silicijskom nitridnom bazom su navodno pogodne za obradu kovkastog lijeva. Perlitne strukture na ili blizu površine smanjuju obradivost ferlitnog temper lijeva [1].

Kod žilavog ili nodularnog lijeva grafit se pojavljuje u kuglastom, a ne u listićavom, obliku. Kao što mu ime sugerira, nodularni lijev ima značajnu kovkost (sa produljenjem između 5 i 15 %). Primjenjuje se tamo gdje je zahtijevana otpornost na umor, na primjer, kod koljenastih i bregastih osovina, kućišta ležaja i spojki.

Zbog visoke kovkosti, nodularni lijev ima dulji kontakt između alata i odvojene čestice i veće temperature rezanja u odnosu na sivi lijev. Nodularna struktura grafita isto sprječava i njegovo širenje preko čela iskošenja, a time i njegov efekt podmazivanja. Rezultat toga je da se u pravilu teže obrađuju od sivog lijeva, zapravo, sa pogleda obradivosti nodularni lijev se može usporediti sa lijevanim čelikom. Obradivost nodularnog lijeva ovisi o njegovoj mikrostrukturi, legirnim elementima, čvrstoći i kovkosti.

Nodularni lijevovi mogu imati primarno ferlitnu, perlitnu ili austenitnu strukturu. Najčešća je perlitna struktura koja uglavnom ima srednju tvrdoću i kovkost. Lijevo sa primarno feritnom strukturom su mekši i više kovki nego perlitne serije i imaju ugrubo jednaku obradivost. Kod perlitnih serija, čvorovi grafita su obično zatvoreni unutar perlita. Povećanje debljine feritnog sloja oko čvora čini se da uglavnom smanjuje obradivost, možda zbog otežanog širenja grafita i njegovog efekta podmazivanja. Serije koje sadrže steadyt i (osobito) austenit su čvršće i više abrazivne nego druge serije i najteže se obrađuju.

Utjecaj legirnih elemenata na obradivost nodularnog lijeva je sličan onom na sivi lijev. Dodavanje bakra ili kositra smanjuje čvrstoću i usitnjuje perlitnu strukturu čime se povećava obradivost. Dodavanje fosfora povećava formacije steadyta i smanjuje obradivost. Dodavanje kroma, nikla, i mangana povećava abrazivno trošenje alata i smanjuje obradivost. Količina dodanog elementa ima značajan utjecaj na vijek trajanja alata.

Povećanje čvrstoće ili kovkosti smanjuje obradivost. Čini se da kovkost ima veći utjecaj od čvrstoće unutar granica koje se obično susreću kod tih varijabli. Na primjer, serija sa tvrdoćom 280 HB i produljenjem od 6 % u pravilu ima dulji vijek trajanja alata od serije sa tvrdoćom 270 HB i produljenjem od 10 %.

Nodularni lijev se obično obrađuje tokarenjem ili glodanjem sa alatom od prevučenog tvrdog metala ili alatom od kubnog nitrid bora. Keramički alati sa silicijskom nitridnom bazom se ne koriste jer temperature rezanja premašuju temperaturu taljenja staklaste faze u vezivu tih alata, što dovodi do ubrzanog trošenja alata. Suprotno od sivog lijeva, kod nekih nodularnih lijevova se mogu koristiti alati sa pozitivnim prednjim kutem da se smanje sile rezanja i krzanje. Preferiraju se prevlake od crnog željeznog oksida jer povećavaju otpornost na

abrazivno trošenje. Korištenje sredstva za hlađenje uglavnom povećava vijek trajanja alata pod pretpostavkom da to ne dovodi do ljuštenja prevlake zbog toplinskog udara. Dopustive brzine rezanja kod tokarenja, bušenja, glodanja, i dubljenja sa tvrdim metalom su u pravilu dvostruko manje od onih za sivi lijev. Dopustive brzine za alate od kubnog nitrid bora, koji se posebno koriste kod čvršćih serija, su veće, ali mnogo niže od onih korištenih kod rezanja sivog lijeva sa keramičkim alatim sa silicijskom nitridnom bazom. Preporuke za određene serije alata su dostupne od proizvođača alata.

Za razliku od sivog lijeva, nodularni lijev je podložen formiranju naslaga na rubovima oštrice i formiranju naljepaka. Naslage na rubovima se mogu eliminirati smanjenjem posmaka, korištenjem alata s pozitivnim prednjim kutem, povećanjem stražnjeg kuta, i korištenjem sredstva za hlađenje.

Greške kod lijevanja kao što su prebrzo hlađenje, zarobljeni pijesak, i distorzija odljevka, utječu na obradivost nodularnog lijeva na isti način kao i kod sivog lijeva [1].

Vermikularni lijev ima strukturu između sivog i žilavog lijeva i koristi se posebno kod blokova dizel motora i kućišta ležajeva, gdje daje veću čvrstoću. Većina podataka pokazuje da je njegova obradivost isto između obradivosti sivog i nodularnog lijeva. Trenutna proizvodna praksa je bliža onoj za nodularni nego za sivi lijev. To je djelomično zato što kompleksni odljevci načinjeni uglavnom od vermikularnog lijeva mogu sadržavati raspon mikrostruktura, uključujući nodularne strukture u nekim dijelovima. Malo lijevaonica je u stanju proizvoditi odljevke ujednačene kvalitete od vermikularnog lijeva [1].

Bijeli tvrdi lijev i sivi lijev s velikim udjelom silicija i otpornošću na koroziju su lijevovi koji se najteže obrađuju zato jer su krhki i abrazivni. Legirani bijeli lijev koji sadrži nikal se uglavnom brusi na završnu dimenziju, ali ako se koristi postava alata s velikom krutošću i keramički alati može se tokariti i dubiti. Kod ovih materijala bi se u obzir trebali uzeti elektokemijski i elektroerozijski postupci obrade. Ljevovi s velikim udjelom silicija imaju veliku tvrdoću pa se obično bruse na završnu dimenziju. Dodavanje ugljika ili fosfora navodno poboljšava njihovu obradivost, ali degradira druga mehanička svojstva koja mogu biti ključna u dijelovima za koje su namijenjena [1].

2.5.2. Ugljični i niskolegirani čelici

Čelici jako variraju u kemijskom sastavu i mikrostrukturi. Slijedeća dva odjeljka razmatraju obradivost ugljičnog, niskolegiraniog i nehrđajućeg čelika, koncentrirajući se primarno na kovane ili šipkaste proizvode. Lijevani, popušteni, i visokolegirani čelik se detaljno ne razmatraju. Ti materijali su tvrdi od ugljičnog i niskolegiraniog čelika i općenito se mnogo teže obrađuju.

Obradivost čelika ovisi o čvrstoći, kemijskom sastavu, mikrostrukturi, mehaničkom stanju i sklonosti da otvrdnuje tijekom obrade. Kao kod većine materijala, obradivost se smanjuje sa povećanjem tvrdoće. Povećanje tvrdoće povećava sile rezanja, temperature i naprezanja na glavnoj oštrici. Za alate od brzoreznog čelika i alate od sinteriranog tvrdog metala, prekomjerne temperature i naprezanja dovode do plastične deformacije oštrice. Mehaničko stanje materijala, posebno razina prethodne deformacije u hladnome stanju, utječe na sile rezanja i karakteristiku odvojene čestice. Žareni čelik ima manje temperature i sile rezanja, ali zbog povećane kovkosti može proizvesti odvojenu česticu koja se teže lomi. Materijali deformirani u hladnome stanju proizvode veće sile ali i odvojenu česticu koja se lakše lomi. Legure koje brzo otvrdnjavaju tijekom obrade imaju brže trošenje alata, pogotovo zarezno trošenje, nego one koje sporije otvrdnjavaju. Kemijski sastav i mikrostruktura utječu na distribuciju tvrdih čestica unutar jezgre a time i na razinu abrazivnog trošenja. Makro uključine ($>150\text{ }\mu\text{m}$) utječu negativno na obradivost i mogu dovesti do naglog loma alata. Neke od nepoželjnih uključina su Al_2O_3 i Ca zbog toga što su tvrde i abrazivne. FeO i MnO imaju sličan ali slabiji utjecaj [1].

Ugljični čelik koji sadrži manje od 0,3 % ugljika se može klasificirati kao niskougljični, sastoji se primarno od ferita, onaj koji sadrži između 0,3 % i 0,6 % C se klasificira kao čelik sa srednjim sadržajem ugljika, ima prelitno-ferlitnu strukturu, a onaj koji sadrži iznad 0,6 % C kao visokougljični, koji ima perlitnu matricu, i pretežno cementitnu, najtvrdža komponenta čelika, kada udio ugljika prijeđe 0,8 %. Općenito, valjani ugljični čelici postaju tvrdi i manje obradivi kako se povećava udio ugljika. Toplinska obrada ugljičnog čelika može dovesti do formiranja bainitne ili martenzitne faze. Iako su ove faze tvrde od perlitne ili feritne, pomažu kod lomljenja odvojene čestice, tako da se kaljenjem uglavnom poboljšava obradivost.

Ugljični čelici se najčešće kod tokarenja, dubljenja i glodanja obrađuju prevučenim alatima od tvrdog metala. TiC prevlake se koriste da bi se smanjilo kratersko trošenje, TiN (zlatne) prevlake se isto često koriste da bi se smanjilo kratersko trošenje uzrokovano difuzijom. Najčešće se koriste alati s pozitivnim prednjim

kutem, i rezne pločice sa lomačem odvojene čestice. Završna obrada ugljičnog čelika se isto može raditi sa cermentom, tokarenje i dubljenje sa keramičkim alatima sa oksidnom bazom i tokarenje, dubljenje i glodanje sa alatima od kubnog nitrid bora. Bušenje, glodanje žljebova, i izrada unutarnjih navoja kod ugljičnog čelika se može izvoditi sa visokobrzinskim alatima i alatima od tvrdog metala. Rotacijski alati se često presvlače sa TiN prevlakama da bi se smanjilo kratersko trošenje. Većina operacija obrade ugljičnog čelika se izvodi uz korištenje sredstva za hlađenje da bi se kontrolirale temperature alata i obradka [1].

Niskolegirani čelik

Dodavanje legirnih elemenata čeliku u žarenom ili valjanom stanju obično povećava njegovu čvrstoću, što rezultira smanjenjem obradivosti. Mnogi legirni elementi se dodaju da se poveća otpornost na trošenje i naprezanje, i spajaju se s ugljikom formirajući vrlo tvrde, abrazivne karbide, koji smanjuju vijek trajanja alata. Primjeri uključuju krom, nikal, i mangan. Utjecaj legirnih elemenata na obradivost ovisi o sadržaju legura. Niskolegirani čelik se obrađuje više nalik ugljičnom čeliku od odgovarajućih visokolegiranih serija. Sferoidalna struktura kod legiranih čelika dovodi do općenito boljih uvjeta obrade jer smanjuje čvrstoću i raspodjeljuje tvrdi karbidnu fazu u sferodite, što smanjuje abrazivno djelovanje karbida. Kaljene legure čelika imaju bolju kvalitetu obrađene površine od žarenog čelika jer kaljena struktura smanjuje ili u potpunosti eliminira BUE. Međutim, postoje legirni elementi koji se posebno dodaju čeliku da bi mu povećali obradivost kod konvencionalnih i visokih brzina. To uključuje olovo, sumpor, manganov sulfid, fosfor, kalcij, bizmut, selen i telur. U pravilu, ovi aditivi, koji se često koriste u kombinaciji, dovode do netopljivih uključina u matrici. Uz dodatak sadržaju, veličina, oblik, i distribucija uključina utječu na obradivost. Ove uključine uzrokuju lakše deformiranje metalne jezgre i olakšavaju širenje pukotina, što dovodi do manjih sila rezanja, lakšeg lomljenja odvojene čestice, i bolje kvalitete obrađene površine. Dobivene vrste se različito označuju kao lako obradivi, laki za rezanje ili poboljšani čelici za strojnu obradu.

Sumporom impregnirani legirani čelici imaju visoki sadržaj sumpora. Sumpor se obično dodaje u obliku manganovog sulfida, MnS, krutog maziva koji stvara uključine u jezgri. Tijekom rezanja, MnS premazuje i podmazuje prednju površinu alata, smanjujući trenje, temperature, i razinu trošenja alata. Uključine isto poboljšavaju lomljenje odvojene čestice. Ovisno o količini MnS, može doći do negativnog učinka na druga mehanička svojstva čelika kao što su otpornost na koroziju, kovkost, čvrstoća, oblikovljivost i zavarljivost. Dostupan je široki izbor

serija sumporom impregnirani legiranih čelika koje zamjenjuju jedno ili dvoje od ovih svojstava za poboljšanu obradivost.

Olovom legiran čelici sadrže olovo, koji isto formira uključine u jezgri koje služe za podmazivanje prednje površine alata i lomljenje odvojene čestice. Većina olovom legiranih serija isto sadrži druge legirne aditive kao što su MnS i fosfor, zbog toga, oni obično imaju bolju obradivost od sumporom legiranih serija bez olova. Olovom legirani čelici su postali manje česti kako je narasla svjesnost o opasnostima izlaganja olovu. To je dovelo do interesa razvijanja bezolovnih legiranih čelika (npr., serije koje sadrže bizmut). U masovnoj proizvodnji kod koje je veći broj strojeva spojen s jednim kružnim sustavom za hlađenje, potrebno je striktno paziti da se sredstvo za hlađenje mijenja u regularnim intervalima ako se obrađuju olovom legirani čelici. Ako se to ne radi, olovo može porasti na neprihvatljivu razinu u rezervoaru.

Kalcij se ponekad dodaje sredstvima za deoksidaciju u završnim fazama proizvodnje čelika. Deoksidacija kalcijem smanjuje abrazivno trošenje alata i poboljšava obradivost, pogotovo kod visokougličnih serija. Kao i kod drugih serija s poboljšanom obradivosti, bolja obradivost rezultat je formiranja mekih uključina u jezgri. Kemijski sastav uključina ovisi o drugim elementima korištenim kod deoksidacije.

Mikrolegirani čelici sadrže male količine tvrdih elemenata kao što su vanadij i volfram. Oni su najčešće namijenjeni korištenju u valjanom stanju kod sustava koji obično zahtijevaju kovane i toplinski obrađene (kaljenje) čelike, za na primjer, koljenasta vratila. Cilj mikrolegiranja je značajno povećati otpornosti na trošenje i naprezanje u valjanom stanju, tako da je naknadno kaljenje nepotrebno. Većina ispitivanja pokazuje da valjani mikrolegirani čelici imaju značajno bolju obradivost nego kovani, kaljeni ugljični čelici. Kod tih ispitivanja, čvrstoća mikrolegiranih čelika je obično značajno manja nego ona kod gašenih i kaljenih čelika [1].

2.5.3. *Nehrđajući čelici*

Nehrđajući čelici sadrže visoki udio kroma, obično iznad 11 %. Oni se uglavnom teško obrađuju zbog njihove velike vlačne čvrstoće, visoke kovkosti, velike brzine otvrdnjavanja tijekom obrade, niske toplinske vodljivosti, i abrazivnog karaktera. Ova kombinacija svojstava često rezultira visokim silama rezanja, temperaturama, i brzinama trošenja alata, kao i podložnošću zareznom trošenju, formiranju naljepaka, te poteškoća kod lomljenja odvojene čestice, i lošom kvalitetom obrađene površine. Nehrđajući čelici su obično klasificirani u četiri kategorije

ovisno o njihovom primarnom sastavu jezgre: feritni, austenitni, martenzitini i duplex (kombinirana feritni/austenitni) [1].

Feritni nehrđajući čelici se primarno legiraju kromom, iako se molibden, titan, ili niobij mogu dodati nekim vrstama da im se poboljša otpornost na koroziju ili zavarljivost. Ferinte legure su uglavnom bolje obradive od drugih legura. Koriste se u žarenom ili hladno deformiranom stanju ali se toplinski ne obrađuju, tako da je njihova čvrstoća usporedivo mala. Njihova obradivost uglavnom pada sa porastom sadržaja kroma [1].

Martenzitne legure, dodatno kromu, mogu sadržavati ugljik, molibden, i nikal radi povećanja otpornosti na naprezanje. Utjecaj na obradivost martenzitnih nehrđajućih čelika ima tvrdoća, sadržaj ugljika, sadržaj nikla, i metalurška struktura. Kao kod većine materijala, povećanje tvrdoće u pravilu smanjuje vijek trajanja alata i obradivost. Povećanje sadržaja ugljika povećava udio abrazivnih kromovih karbida u jezgri i smanjuje vijek trajanja alata i obradivost. Povećanje sadržaja nikla povećava čvrstoću kod žarenja i isto smanjuje obradivost. Metalurški faktor koji ima najjači utjecaj na obradivost je udio ferita u jezgri. Obradivost je uglavnom bolja sa povećanjem sadržaja slobodnog ferita [1].

Austenitni nehrđajući čelici sadrže dušik, ugljik, i nikal ili mangan uz krom. Oni pokazuju veliku otpornost naprezanju, visoku kovkost, i čvrstoću, i u pravilu se teže obrađuju od feritnih i martenzitnih nehrđajućih čelika. Specifične poteškoće koje se susreću kod obrade austenitnih nehrđajućih čelika uključuju velike brzine trošenja zbog velikih sila rezanja i temperatura, BUE formacije, problemi s odvođenjem odvojene čestice, loš integritet površine (otvrdnuće obrađene površine), i sklonost krzanju. Mali vijek trajanja alata je povezan sa čvrstoćom žarenja, koja se povećava sa povećanjem sadržaja nikla. Povećanje sadržaja ugljika povećava brzinu otvrdnjavanja kod obrade i smanjuje obradivost. Abrazivni spojevi ugljika i dušika se mogu formirati u jezgri i smanjiti vijek trajanja alata. To se može kontrolirati dodavanjem titana ili niobija. Kao i kod drugih nehrđajućih čelika, tvrdoća se povećava a obradivost se smanjuje sa povećanjem sadržaja nikla. Umjereno hladno deformiranje materijala u pravilu poboljšava obradivost tako da smanjuje sklonost stvaranja BUE formacija i poboljšava kvalitetu i integritet obrađene površine [1].

Duplex legure imaju kemijski sastav sličan austenitnim nehrđajućim čelicima ali se uglavnom teže obrađuju zbog njihove velike čvrstoće kod žarenja. Obrada duplex legura može biti posebno zahtjevno jer ne postoje standardno legirane serije.

Feritni, martenzitni, i austenitni nehrđajući čelici sadrže legirne aditive namijenjene za poboljšavanje obradivosti. Uobičajeni aditivi uključuju sumpor, selen, telur, bizmut, i fosfor. Kao i kod ugljičnih i niskolegiranih čelika, ti aditivi su efikasni jer stvaraju spojeve koji imaju malu topljivost u jezgri i precipitiraju kao uključine koji služe za podmazivanje prednje površine alata i za lomljenje odvojene čestice. Sumpor je najčešće korišteni aditiv, nakon njega selen. Obradivost se isto može poboljšati variranjem sredstava za deoksidaciju koji se koriste za kontrolu oksidnih uključina u jezgri kod proizvodnje čelika.

Opće smjernice kod obrade nehrđajućeg čelika uključuju:

- koristiti niže brzine rezanja i posmake nego kod ugljičnih čelika
- koristiti krute alate i postavke da se izbjegne krzanje
- držati posmak iznad minimalne razine da se izbjegne loš integritet površine
- koristiti oštre, fino brušene alate da se izbjegne BUE
- koristiti pogodna sredstva za hlađenje sa dostatnim protokom za otklanjanje topline

Nehrđajući čelik se može obrađivati sa brzoreznim čelicima, alatima od tvrdog metala, keramičkim i alatima od kubnog nitrid bora [1].

2.5.4. Čelici za cementiranje

Čelici za cementiranje ubrajaju se u nelegirane konstrukcijske čelike, kvalitetne čelike, kao i u legirane plemenite čelike. Svima je zajedničko relativno niski sadržaj ugljika koji ne prelazi granicu od 0.2 %.

Čelici za cementiranje obrađuju se obradom odvajanja čestica isključivo prije obrade cementiranja. Budući da je struktura takvog čelika pretežno od ferita i samo malo perlita, utjecaj na istrošenost alata je malena. Kako bi se izbjeglo stvaranje naljepka teži se visokim brzinama rezanja zbog niske čvrstoće obradka. Dobra kvaliteta obrađene površine može se dobiti ako se izabere dobra kombinacija odgovarajućeg sredstva za hlađenje, odgovarajuće geometrije alata (pozitivni prednji kut) ili smanjenjem posmaka [9].

Za poboljšavanje obradivosti čelici se toplinski obrađuju, ovisno o njihovim legirnim elementima, na određenu feritno - perlitnu strukturu ili određenu čvrstoću. Žarenje na grubo zrno često se koristi kod legirnih čelika za cementiranje da bi se smanjila sklonost lijepljenju koje stvara poteškoće u toku obrade. Pri tome se istovremeno smanjuje jako izražena sklonost trakastoj strukturi, koja je jako štetna kod obrade odvajanjem čestica, naročito kod razvrtavanja i provlačenja. Brzim hlađenjem kod toplinske obrade nastajanje trakaste strukture je djelomično suzbijeno ali se ipak ponovno pojavljuje kod ponovnog zagrijavanja na točku pretvorbe. Potpuno uklanjanje je moguće primjenom difuzijskog žarenja.

Nakon obrade odvajanja čestica slijedi cementiranje: rubne zone obradka pouglijčavaju se na 0,6 – 0,9 % ugljika, vrijednost tvrdoće nakon kaljenja raste na 60 HRC. Ovaj postupak primjenjuje se kod dijelova koji su izloženi trošenju kao što su zupčanici, osovine mjenjača, bregaste osovine i čahure. U izradi tih dijelova nakon cementiranja u nekim slučajevima mora nastupiti još naknadna obrada odvajanjem čestica. Za tu završnu obradu visoko popuštenog kaljenog čelika (> 45 HRC), osobito su pogodni finoizrznati tvrdi metali, miješana keramika i CBN - rezni materijali. Pri tome se pojavljuje jako velika sila rezanja. Lom čestice ne predstavlja problem i u pravilu se postiže vrlo dobra kvaliteta obrađene površine [9].

Česti predstavnici čelika za cementiranje su npr. Ck 15, 16MnCr5, 20MoCr4, 18CrNi8 [1].

2.5.5. Čelici za poboljšavanje

Čelici za poboljšavanje sadrže između 0,2 i 0,6 % ugljika i posjeduju zbog toga višu čvrstoću nego čelici za cementiranje. Glavni legirni elementi su silicij, mangan, krom, molibden, nikal i vanadij.

Obradivost čelika za poboljšavanje ovisi pretežno o mikrostrukturi, ovisno o provedenoj toplinskoj obradi.

Nelegirani čelik za poboljšavanje pokazuje pogoršanje obradivosti s povećanjem udjela perlita u strukturi; zbog toga je potrebno primijeniti niže brzine rezanja. Kod visokih brzina rezanja smanjuje se vijek trajanja alata zbog loma uslijed stvorenog kratera, osobito onda kada čelik sadrži veći udio kroma, mangana i vanadija (legirani čelik za poboljšavanje). Što su karbidi više sferodizirani u strukturi to se većom brzinom rezanja mogu obrađivati čelici za poboljšavanje u žarenom stanju. Istovremeno se ipak povećava sklonost lijepljenju tako da kvaliteta obrađene površine obradka opada. Struktura s mješavinom lamelarnih i zrnatih cementita

(npr. kod nezavršenog sferodizacijskog žarenja), posjeduje vrlo dobru obradivost [9].

Kod tokarenja, glodanja i bušenja, sumpor od 0,06 do 0,1 % u čeliku za poboljšavanje, izaziva poboljšanje obradivosti. Kod još viših vrijednosti poboljšano djelovanje sumpora je neznatno.

Toplinska obrada čelika za poboljšavanje može se samo u nekim slučajevima uskladiti s dobrom obradivosti, te se mora prije svega voditi računa o svrsi primjene. Iz toga proizlazi da su za postizanje dobre obradivosti potrebni različiti načini toplinske obrade.

U mnogim slučajevima poboljšavanje se primjenjuje između grube i završne (fine) obrade. Gruba obrada, kod koje dolazi do velike količine odvojenih čestica, vrši se većinom na obradcima u normaliziranom stanju čija se obradivost, na temelju feritno – perlitne strukture, odlikuje relativno niskim trošenjem alata. Veliki dio obrade odvajanjem čestica, čelika za poboljšavanje, nastupa nakon obrade poboljšavanja i nakon žarenja. Zbog toga, kod obrade visokim brzinama rezanja, pojavljuje se povećano istrošenje alata.

Kao rezni materijal, kod obrade odvajanjem čestica čelika za poboljšavanje u obzir dolaze u prvom redu tvrdi metali skupine P. Oni su pogodni za gotovo sve slučajeve obrade. Kod bušenja i narezivanja navoja ipak se pretežno upotrebljavaju alati izrađeni od brzoreznih čelika (HSS).

Učinkovito se mogu upotrijebiti i prevučeni tvrdi metali, kod tvrdoće obradka > 45 HRC, finoizrnatni tvrdi metali, rezna keramika i CBN [1].

2.5.6. Legure magnezija

Legure magnezija imaju najbolju obradivost od uobičajenih konstrukcijskih metala u smislu vijeka trajanja alata, sile rezanja, utrošku snage i kvalitete obrađene površine. Zbog heksagonske strukture i niske kovkosti magnezijevih legura, sile rezanja i utrošak snage su u pravilu 50 do 80 % niže nego za aluminijeve legure u usporedivim uvjetima. Također, legure magnezija imaju nisko talište (u pravilu manje od 650 °C), tako da su temperature rezanja niske. Zbog njihove krhke prirode, formiraju kratke, segmentirane odvojene čestice, koje ograničuju trajanje kontakta između alata i odvojene čestice. Magnezij ima visoku toplinsku vodljivost i ne stvara legure sa čelikom. Zbog svih tih razloga, brzina trošenja zbog toplinskog omekšavanja i difuzije je mala za alate od brzoreznog čelika i tvrdog metala (WC). Većina podataka pokazuje da je vijek trajanja alata kod suhe obrade legura magnezija ugrubo pet puta veća nego kod obrade aluminija s

podmazivanjem u inače usporedivim uvjetima. Vijek trajanja alata u trajanju od stotina sati, ili desetine proizvodnih smjena u masovnoj proizvodnji, je dostignuta ranih 1960-tih. U novije vrijeme, alati od polikristanih dijamanta se koriste za obradu magnezija, iz čega proizlazi vijek trajanja alata koji se približava milijunu obrađenih obradka u nekim operacijama glodanja i bušenja. Legure magnezija pod normalnim uvjetima rezanja ostvaruju dobru kvalitetu obrađene površine; prosječna hrapavost od $0.1\text{ }\mu\text{m}$ se može ostvariti tokarenjem ili glodanjem pri niskim ili visokim brzinama, sa ili bez podmazivanja, tako da su operacije brušenja i poliranja često nepotrebne.

Dva su glavna problema kod obrade magnezija: opasnost od požara i formiranje naljepaka (BUE).

Magnezij gori kada se zagrije do temperature taljenja. Kod obrade magnezija, vatra će se najvjerojatnije pojaviti kada se tanke strugotine ili iverje sa visokim omjerom površina/volumen proizvedu i dopuste nagomilati. Izvor zapaljenja može biti toplina dobivena trenjem uzrokovanog alatom koji je tup, strgan, nepropisno uzemljen, ili dopušten da stoji na kraju rezanja, ili iskrama stvorenim izvan obradnog procesa. Da se minimizira opasnost od požara, slijedeće prakse bi se trebale održavati:

1. Trebali bi se koristiti oštri alati s najvećim mogućim stražnjim kutem.
2. Koristiti veće posmake, koji proizvode deblju odvojenu česticu, kada je moguće.
3. Trebalo bi na kraju rezanja izbjegavati mirovanje alata na obradku.
4. Odvojene čestice bi trebalo sakupljati i odlagati redovito.
5. Trebali bi se koristiti odgovarajuća sredstva za hlađenje kada su potrebni mali posmaci.

Kako odvojene čestice magnezija reagiraju sa vodom formirajući magnezijev hidroksid i slobodni vodik, sredstva za hlađenje bazirana na vodi su se tradicionalno izbjegavala. Prihvaćena praksa je bila suha obrada kada je moguće i koristiti mineralno ulje za hlađenje kada je potrebno. Međutim, suha obrada magnezija u velikim količinama predstavlja dugoročan problem čišćenja, pogotovo kada se upotrebljavaju procesi poput bušenja ili rezanja navoja koji stvaraju finu odvojenu česticu. Zrakom nošene čestice se mogu tijekom vremena nakupiti u prostorima poput grijalica i otvora elektromotora, uzrokujući neočekivane požare. U zadnjih 20 godina, razvila su se sredstva za hlađenje bazirana na vodi koje se mogu koristiti sa magnezijem bez pretjeranog stvaranja hidrogena. Ta sredstva se sada koriste u proizvodnji nekih instalacija i navodno u usporedbi sa suhom

obradom povećavaju vijek trajanja alata i smanjuju rizik požara. Brušenje ili poliranje magnezija bi se trebalo izbjegavati, ali kada je potrebno, trebalo bi se izvoditi na namjenskim strojevima opremljenima sa sustavom za prikupljanje prašine koji koristi vodu.

Formacije naljepaka su primijećene kod suhe obrade lijevanih legura magnezija-aluminija sa alatima od brzoreznog čelika ili tvrdog metala. Formacije naljepaka se mogu smanjiti ili ukloniti koristeći mineralna ulja za hlađenje ili korištenjem alata od polikristalnih dijamantata. Bočna nakupljanja zbog adhezije se isto mogu pojaviti kod brzina rezanja iznad 600 m/min, pogotovo kod suhe obrade. To može dovesti do povećanja sila rezanja, i loše kvalitete obrađene površine.

Opsežne tablice zabilježenih brzina, posmaka, dubina rezanja, i geometrije alata za različite operacije su dostupne kod dobavljača magnezija. Općenito, tokarenje i dubljenje se izvode pri brzinama između 700 i 1700 m/min, sa posmacima većim od 0,25 mm/okr, i dubinama rezanja do 12 mm koristeći alate sa pozitivnim (do 20°) prednjim kutem, velikim stražnjim kutem, i brušenim rubovima. Čeono glodanje se može izvoditi pri brzinama do 3000 m/min, posmacima između 0,05 i 0,5 mm po zubu, i dubinom rezanja do 12 mm. Manji posmaci i veće brzine se koriste pri završnoj obradi. Glodala koja se koriste imaju pozitivnu rezu geometriju i otprilike jednu trećinu manje zubi nego glodala usporedivih promjera koja se koriste u obradi drugih metala [1].

2.5.7. Aluminijske legure

Legure aluminija također svrstavaju među one bolje obradivima od uobičajenih metala. Sile rezanja su uglavnom niske, a zato što aluminij dobro provodi toplinu i većina legura se tali pri temperaturama između 500 i 600 °C, temperature rezanja i stupanj trošenja alata su također mali. Najveće probleme kod obradivosti aluminijevih legura predstavljaju vijek trajanja alata, karakteristika odvojene čestice, stvaranje naljepaka, i kvaliteta obrađene površine.

Dvije velike vrste od uobičajeno obrađivanih legura aluminija jesu lijevane legure, koje se koriste kod proizvodnje automobilskih pogona i komponenata, i gnječene legure, koje se posebno koriste kod konstrukcija (npr. proizvodnja okvira aviona) [1].

Ljevane legure aluminij-silicij su najčešće obrađivane lijevane legure aluminija po volumenu, opsežno se koriste u automobilskoj industriji. Sa pogleda obrade lako je razlikovati između eutektičkih legura, koje sadrže 6 do 10 % silicija, i

hipereutektičkih legura koje uglavnom sadrže 17 do 23 % silicija. Kod eutektičkih legura silicij se susreće samo u eutektičkoj fazi, a kod hipereutektičkih legura udio silicija prelazi eutektičku granicu, tako da su čestice slobodnog silicija ugrađene u jezgri. Većina eutektičkih legura, kada su pravilno kaljene, mogu ostvariti dug vijek trajanja alata pri relativno visokim brzinama rezanja. Brzine do 450 m/min se mogu koristiti kod tokarenja sa alatima od tvrdog metala, a brzine visoke do 5000 m/min se mogu postignuti u nekim postupcima glodanja sa dijamantnim alatom. Od uobičajenih eutektičkih legura, najlakše obradive su one koje sadrže 6 % Si, 3,5 % Cu, i one sa 3.2 % Si, 0.9 % Cu i 0.18 % Fe. Prisutnost tvrdih uključina kod obrade hipereutektičkih legura ograničuje ostvarive brzine rezanja i vijek trajanja alata. Čestice slobodnog silicija su mnogo tvrđe od okolne jezgre, i kod konvencionalnih alata proizvode ubrzano abrazivno trošenje, a kod dijamantnih alata trošenje i krzanje. Brzine rezanja su tipično ograničena na otprilike 100 m/min kod tokarenja sa alatima od tvrdog metala bez prevlake, i do 1000 m/min kod glodanja sa dijamantnim alatom. Serije karbida koje se koriste za lijevano željezo su pogodne za obradu aluminijskih legura.

Kod bušenja, trošenje postaje pretjerano kod brzina iznad 200 do 400 m/min sa svrdlima od tvrdog metala, iako se svrdla prevučena dijamantom mogu koristiti kod brzina do 600 m/min.

Lijevanje u pijesku proizvodi krupniju mikrostrukturu sa većim česticama silicija nego lijevanje u višekratne kalupe, i tako dovodi do kraćeg vijeka trajanja alata i nižih dopuštenih brzina rezanja. Lijevanje u kalupima proizvodi najbolju mikrostrukturu.

Željezo, koje je prisutno u svim lijevanim legurama, isto formira tvrde uključine koje imaju negativan utjecaj na vijek trajanja alata i obradivost. Željezo se namjerno dodaje legurama lijevanim u kalupima da bi se izbjeglo spajanje s kalupom. Dodatak do 0,2 % mangana tim legurama poboljšava strukturu željeza i produljuje vijek trajanja alata.

Bakar i magnezij povećavaju tvrdoću leguri, poboljšavaju kvalitetu obrađene površine i smanjuju tendenciju legure da se naljepljuje na rub reznog alata. Magnezij očvršćuje matricu, tj. osnovu legure, i čineći to, smanjuje koeficijent trenja između alata i obradka, a rezultat je kraća i uža odvojena čestica i uz to magnezij pruža bolju kvalitetu obrađene površine. Veliki broj poteškoća koje se javljaju kod obradivosti lijevanih legura koje sadrže druge legirne elemente, kao magnezij, cink, ili bakar, su iste onima za odgovarajuće gnječene legure [1].

Vijek trajanja alata koji se približava milijunu obradka se može ostvariti u nekim masovnim proizvodnjama koristeći alate od polikristalnih dijamanta. Kada se

obrađuju sa oštrim alatima i pod odgovarajućim uvjetima, kod aluminijskih legura dobiva se fina kvaliteta obrađene površine prilikom tokarenja, bušenja i glodanja, minimizirajući tako potrebne operacije brušenja i poliranja.

Aluminij se obično obrađuje sa alatima od brzoreznog čelika, tvrdog metala i polikristalnih dijamantata. Keramički alati sa silicijskom nitridnom bazom se ne upotrebljavaju sa aluminijem zbog visoke topljivosti silicija u aluminiju. Vijek trajanja alata je naročito važan kod legura koje sadrže tvrde uključine kao što su aluminijev oksid, silicijev karbid, ili slobodan silicij [1].

Gnječene legure koje imaju bakar kao osnovni legirni element imaju najbolju obradivost od gnječenih aluminijskih legura, vrlo su čvrste i otporne na koroziju. Bakar formira tvrde čestice u jezgri koje ubrzavaju trošenje alata. Pravilno popuštanje bi se trebalo osigurati da bakar uđe u otopinu. Uglavnom najteže za obrađivanje su vrste koje imaju silicij kao osnovni legirni element, jer sadrže slobodni silicij. Vrste koje imaju magnezij kao osnovni legirni element su meke legure koje se uglavnom obrađuju jednako lako kao vrsta koje su legirane bakrom. Vrste koje imaju silicij i magnezij kao osnovni legirni elementi se teško obrađuju zato što su magnezij i silicij povezani u tvrde Mg_2Si čestice. Kod ovih vrsta se najlakše obrađuju legure koje sadrže bizmut koji je isključivo dodan da se poboljša obradivost.

Kao što je gore navedeno, osim vijeka trajanja alata, glavnu pozornost kod obrade aluminija ima odvođenje odvojene čestice, kvaliteta obrađene površine i integritet. Odvođenje odvojene čestice je posebno važno kod bušenja i tokarenja pri visokim brzinama rezanja. Svrdla konstruirana sa velikim kutom nagiba spirale i otvorenim (paraboličnim) žlijebom su najpogodnija za legure aluminija jer minimiziraju smetnje kod odvođenja odvojene čestice. Poliranje žljebova u smjeru kretanja odvojene čestice je isto efektivno kod sprječavanja takvih problema, kao i dovođenje sredstva za ispiranje kroz alat. Kod tokarenja, problem odvođenja odvojene čestice i nastajanje naljepaka se pojavljuje kod legura koje formiraju kontinuiranu odvojenu česticu, kao kod vrsta gnječenih legura kojima je cink osnovni legirni element. Druge legure, poglavito većina lijevanih i gnječenih legura legiranih bakrom, uglavnom formiraju kratku, lomljenu odvojenu česticu koju je lakše odvoditi. Međutim, čak i za ove legure, obično je kod većih brzina rezanja potrebno sredstvo za ispiranje za odvođenje odvojene čestice.

Problemi sa kvalitetom obrađene površine se pojavljuju pogotovo kod obrade mekih legura koje sadrže 6 % Si i 3,5 % Cu, komercijalno čistih i manganom legiranih vrsta gnječenih legura. Za te vrste, BUE se može formirati na reznoj

oštrici, a materijal umjesto da formira odvojenu česticu se može trgati, čime proizvodi neravnu i izdubljenu obrađenu površinu. Ti problemi su ozbiljniji kod alata od tvrdog metala nego kod dijamantnih alata. Najčešći pristup minimiziranju tih problema je povećanje brzine rezanja, pod uvjetom da to ne dovodi do poteškoća kod odvođenja odvojene čestice. Druge efikasne strategije uključuju korištenje sredstva za ispiranje i oštarih alata bez prevlaka sa jako pozitivnim prednjim kutem i poliranom prednjom površinom. TiN prevlake, posebno za svrdla, se isto često nađu efikasnim u smanjenju trenja i naljepaka kod obrade lijevanih legura [1].

Tvrdoća je jedan od najvažnijih metalurških parametara koji djeluju na obradivost legura. Zapravo, činjenica je da se legure aluminija razlikuju od mnogih drugih metala u tome što se njihova obradivost poboljšava kako se tvrdoća povećava. Toplinska obrada koja povećava tvrdoću smanjit će naljepke (BUE) na alatu i poboljšat će kvalitetu obrađene površine.

Mnoga sredstva za hlađenje koja se uspješno koriste prilikom obrade željeznih materijala nisu prikladne za obradu aluminijskih legura, posebno zbog tri razloga [14]:

- Prvi razlog je taj što aluminijske legure, kada se obrađuju, brzo razvijaju tvrdi aluminijski oksidni film na površini. Zbog toga ne dolazi do čistog formiranja odvojene čestice i dolazi do brzog trošenja alata. Iz toga razloga, određeni SHIP, sadrži aditive koji sprečavaju formiranje aluminijskog oksida.
- Drugi razlog je taj što aluminijske legure, obično, sadrže značajan udio silicija, koji ih čini jako adhezijskim. Zbog toga dolazi do brzog zagrijavanja, uzrokujući zavarivanje odvojene čestice i stvaranje naljepaka (BUE) te dolazi do drastičnog smanjenja vijeka trajanja alata ako se ne koristi pravilan SHIP koji treba biti pod velikim tlakom.
- Treći razlog je taj što aluminij i njegove legure imaju jedan od najvećih koeficijenata toplinskog širenja uz relativnu elastičnost i mekoću.

2.5.8. Legure bakra

Bakar i njegove legure, mjedi i bronce, se u većini slučajeva lako obrađuju. Iako postoje značajne iznimke. Legure bakra u pravilu imaju točku taljenja manju od 1050°C. Temperature ovih veličina su dovoljne da uzrokuju mekšanje mnogih vrsta alata, ali se rijetko postižu na oštrici alata zbog velike toplinske vodljivosti ovih materijala i činjenice da se redovito režu pri nižim brzinama. Mjedi, na primjer, se često obrađuju u obliku žice ili šipke na automatskim tokarilicama (npr., kod

proizvodnje električnih dijelova ili hidrauličnih cijevnih priključaka). Mali promjer dijelova ograničuje maksimalno dostižnu brzinu rezanja. Oni se često obrađuju sa alatima od brzoreznog čelika ili od tvrdog metala. Alati od polikristalnih dijamanta bi se, u načelu, mogli koristiti za obradu mnogih bakrenih legura, ali u praksi se ta opcija ne čini često korištenom.

Čisti bakar i mjedi se obično obrađuju u obliku kovane ili provučene šipke. Čisti bakar je materijal koji se teško obrađuje zbog svoje visoke kovkosti. Uzrokuje velike sile rezanja, pogotovo kod niskih brzina rezanja, koje mogu dovesti do prekomjernog progiba, vibracije, i loma alata, pogotovo svrdla. Njegova visoka kovkost dovodi do poteškoća kod lomljenja odvojene čestice i do prekomjernog formiranja naljepaka. Također ima lošu kvalitetu obrađene površine kod niskih brzina rezanja. Čisti bakar bi se trebao rezati pri relativno visokim brzinama rezanja (većima od 200 m/min) sa oštrim alatima. Obradivost bakra se povećava njegovom obradom u hladnom stanju, jer to smanjuje kovkost. Legiranjem električnih vrsta sa sumporom ili telurijem da se formiraju lako obradive vrste također poboljšava karakteristike odvojene čestice i obradivost.

Legiranje bakra sa cinkom da se formira mjed značajno poboljšava njegovu obradivost. Sile rezanja su smanjene za 70/30 (jednofazni ili α) mjedi i naročito za 60/40 (dvofazni ili α - β) mjed. Alfa mjed ima diskontinuiranu odvojenu česticu i lošu kvalitetu obrađene površine kod niskih brzina rezanja. Druge vrste mjedi (npr., crvena mjed) proizvode kontinuiranu odvojenu česticu koja se lakše lomi nego ona dobivena kod čistog bakra ali koja još uvijek može predstavljati problem kod odvođenja. Lomljenje odvojene čestice se poboljšava dodatkom olova, koji se taloži unutar mekih uključina koje podmazuju i predstavljaju slabe točke odvojene čestice. Olovom legirana mjed, koja u pravilu sadrži 2 do 3% olova po masi, se smatra lako obradivim materijalom. Koristi se pogotovo kod tokarenja sa brzinama rezanja do 300 m/min, iako se koristeći alate od tvrdog metala kod obradka većih promjera mogu postići mnogo veće brzine.

Legure od lijevanog bakra se obično koriste za spojnice i ležajeve. Sa pogleda obradivosti, ove legure se mogu podijeliti u tri skupine. Prva skupina obuhvaća jednofazne legure sa velikim udjelom bakra ali koje sadrže olovo. Kao i kod olovom legirane mjedi, ove legure su lako obradive jer sadrže olovo koji olakšava lomljenje odvojene čestice. Druga skupina obuhvaća vrste sa dvije ili više faza, u kojoj je sekundarna faza tvrđa ili krhkija od jezgre. Materijali u ovoj skupini uključuju mnoge aluminijeve bronce, silicijeve bronce, i bronce s velikom udjelom kositra. Krhka faza poboljšava lomljenje odvojene čestice, tako da ovi materijali u pravilu daju kratku, lomljenu odvojenu česticu. Ipak, tvrda faza povećava abrazivno trošenje alata, tako da je obradivost ovih vrsta označena kao osrednja.

Treća skupina obuhvaća manganove bronce visoke čvrstoće i aluminijeve bronce s visokim udjelom željeza i nikla. Ove materijale je teško obrađivati jer daju kontinuiranu odvojenu česticu i sadrže tvrde faze koje povećavaju trošenje alata [1].

2.5.9. Legure titana

Titan i njegove legure su zbog njihovog povoljnog omjera čvrstoće i gustoće u temperaturnom području od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+550\text{ }^{\circ}\text{C}$ u prednosti pred mnogim drugim inženjerskim materijalima. Također im je značajna otpornost na umor i puzanje, imaju malu toplinsku rastezljivost i visoku postojanost u različitim agresivnim sredinama.

Titan je polimorfan metal. Na sobnoj temperaturi titan ima heksagonsku gusto slaganu (HCP) rešetku, α titan, koja na otprilike $885\text{ }^{\circ}\text{C}$ prelazi u kubičnu prostornu centriranu (BCC) rešetku, β titan, koju zadržava do tališta [15]. Dodavanje legiranih elemenata može značajno promijeniti temperaturu transformacije, tako da je β -faza stabilna i može se zadržati na sobnoj temperaturi.

Postoje četiri glavne skupine titanovih legura:

Nelegirani titan, koji katkad zbog povećanja čvrstoće sadrži male količine kisika ili željeza.

α legure, koje sadrže stabilizatore α -faze kao što su aluminij, kisik, dušik, i ugljik. Zavarljivost, žilavost, čvrstoća i stabilnost pri povišenim temperaturama glavna su obilježja α legura. Također imaju dobru žilavost i čvrstoću i pri sniženim temperaturama. Otpornost na oksidaciju i koroziju je jednaka kao i kod β i $(\alpha+\beta)$ legura, teže se oblikuju deformiranjem i nisu toplinski očvrstljive unatoč postojanju β/α prekrystalizacije [15].

α - β legure, koje sadrže α - i β -faze i koje su legirane sa α - i β -stabilizatorima. Povišenje čvrstoće $(\alpha+\beta)$ legura može se postići toplinskom obradom. No to je prilično osjetljiv postupak jer nepravilnim provođenjem može doći do pojave krhkosti radi izlučivanja metastabilne prijelazne ω faze [15].

β -legure, koje su legirane sa β -stabilizatorima kao što su molibden, vanadij, niobij, bakar, i silicij. Nasuprot monofaznim α legurama, β legure mogu postići visoku čvrstoću toplinskom obradom, osobito u hladno očvrnutom stanju. Ova legura ne samo da ima veliku kovkost, već i visoki omjer čvrstoća/gustoća, a također je i zavarljiva. Gustoća β legura je povišena dodatkom kroma i vanadija, teških metala više gustoće, koji se dodaju radi stabilizacije β faze pri sobnoj temperaturi. Uglavnom, povećanje sadržaja β -faze povećava čvrstoću i smanjuje obradivost, iako povećanje sadržaja β -faze kod nekih slučajeva poboljšava oblik odvojene čestice što dovodi do bolje obradivosti. Glavna prednost β legura je sposobnost hladnog oblikovanja deformiranjem [15].

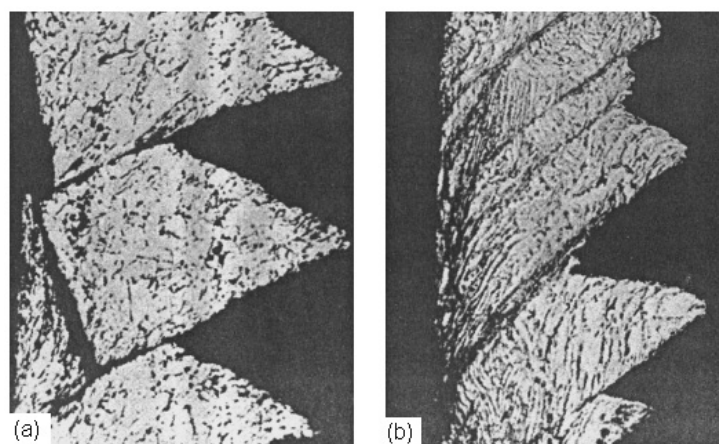
Većina legura korištenih kod zrakoplova, kao na primjer, Ti-6Al-4V, su α - β legure.

Titanove legure se smatraju teško obradivima zbog slijedećih razloga [1]:

- zadržavaju visoku čvrstoću kod viših temperatura, povećavajući sile rezanja i naprezanja alata
- proizvode tanku odvojenu česticu, koja povećava temperaturu rezanja i naprezanja na reznjoj oštrici
- imaju usporedivo malu toplinsku provodljivost, što dodatno povećava temperature rezanja
- imaju veliku tendenciju kemijskoj reakciji sa gotovo svim alatnim materijalima pri radnim temperaturama
- zbog njihovih termomehaničkih svojstava, često proizvode nasječenu odvojenu česticu
- imaju mali modul elastičnosti, što može dovesti do pretjeranog izvijanja obradka i krzanja
- podložni su oštećenjima površine tijekom obrade, i pod mnogim uvjetima daju lošu kvalitetu obrađene površine
- tijekom obrade se mogu zapaliti zbog često generiranih visokih temperatura

Jedna od karakteristika titana je da se dobivaju nehomogene odvojene čestice s obzirom na deformaciju. To je zbog dva razloga koji su prikazani na slici 15. Slika 15a prikazuje odvojene čestice dobivene pri vrlo malim brzinama. Do loma odvojene čestice dolazi periodički, i pojavljuje se klizanje velikih blokova praćeno

zavarivanjem kako se stvara nova odvojena čestica. Rezultat je vrlo nehomogena odvojena čestica sa nazubljenim stražnjim dijelom.



Slika 15. Kontinuirana odvojena čestica kod titanovih legura. (a) Mala brzina rezanja (25mm/min). (b) Velika brzina rezanja (53 m/min). [10]

Slika 15b prikazuje odvojene čestice titana dobivene pri relativno visokim brzinama rezanja (53 m/min). Vidi se da kod stvaranja ovih odvojenih čestica ne dolazi do klizanja velikih blokova praćenih zavarivanjem, već dolazi do povezanih koncentriranih posmaka. Toplina povezana sa inicijalnim klizanjem uzrokuje toplinsko omekšavanje i zbog toga više posmično naprezanje i više deformacije, itd. Rezultat je opet vrlo nehomogena nazubljena odvojena čestica ali iz drugog razloga nego na slici 15a.

Prema tome evidentno je postojanje raznih oblika, tipova odvojenih čestica kod titana s obzirom na homogenost naprezanja [10].

Što je veći sadržaj legirnih elemenata i što je veća tvrdoća, obradivost titanovih legura se generalno smanjuje. Obrada odvajanjem čestica titanovih legura zahtjeva samo nešto veće sile rezanja nego što to zahtjeva obrada čelika, ali titanove legure imaju metalurške karakteristike koje ih čine teže za obrađivat nego čelik ekvivalentne tvrdoće. Beta legure su najteže za obrađivat od svih titanovih legura.

Zbog svih ovih faktora, vijek trajanja alata i dopuštene brzine obrade su za titanove legure niže nego za većinu drugih metala. Posebno, izbor alata je ograničen zbog velike tendencije kemijskoj reakciji. U većini slučajeva, titanove legure se obrađuju brzoreznim ili karbidnim alatom bez prevlake. Brzorezni alati s velikim sadržajem kobalta (HSS-Co serije) u pravilu daju bolji vijek trajanja alat

nego standardne brzorezne serije. Za karbidne alate, standardne vrste kao što su ISO K20 djeluju bolje nego vrste korištene za rezanje čelika kao što su ISO P01. Vrste korištene za rezanje čelika, koje su legirane sa TiC i TaC, se brže troše difuzijom. Prevučeni karbidni alati se isto troše brže od karbidnih alata bez prevlake. Među razvijenijim materijalima, keramike kao što su sialon (silicij-aluminij-oksinitrida) i materijali bazirani na aluminiju nisu pogodni za obradu titana zbog brzog kemijskog i abrazivnog trošenja. Navodno alati od kubnog nitrid bora i polikristalnih dijamantata osiguravaju odgovarajući učinak, ali se rijetko koriste zbog njihove veće cijene niske produktivnosti uvjetovane karakteristikama odvojene čestice materijala.

Kao što je gore navedeno, legure titana proizvode lamelarnu odvojenu česticu kod većine uvjeta rezanja. Nasječena odvojena čestica je rezultat visoke čvrstoće, male toplinske vodljivosti, i pri višim temperaturama karakteristike omekšavanja materijala. Ovaj oblik odvojene čestice može dovesti do velikih varijacija u iznosu sile rezanja i izazvati krzanje. Loša termička svojstva titana isto mogu dovesti do lošeg integriteta obrađene površine zbog pojave velikih temperaturnih gradijenata i diferencijalnog hlađenja površinskog sloja. Titan također pranja uz obične alatne materijale, što rezultira velikim trenjem i tendencijom za oštećenje površine zbog deformacija i BUE formacija [1].

Kao rezultat tih ograničenja materijala, slijedeće opće smjernice bi se trebale pridržavati kod obrade titanovih legura [1]:

- trebale bi se koristiti male brzine rezanja da se limitiraju temperature rezanja
- trebali bi se održavati veliki posmaci da se izbjegne oštećenje površine
- trebao bi se održavati veliki volumen sredstva za hlađenje da se smanje temperature i odvodi odvojena čestica
- trebali bi se koristiti oštri alati sa pozitivnim prednjim kutem i dovoljno velikim stražnjim kutem da se izbjegnu BUE formacije
- trebali bi se koristiti kruti alati i postavke da se izbjegne pretjerano izvijanje obradka i krzanje

Mnogi koji su proučavali obradivost titana su sugerirali da karbidi (WC-Co) sa sadržajem Co od 6 % i sa veličinom WC zrna između 0,8 i 1,4 μm daju optimalne rezultate. Osim sa alatima od cementiranih karbida (WC-Co) titanove legure se obrađuju i sa obloženim karbidnim alatom u rasponu brzina od 50 do 100 m/min. Obloga pruža dobru toplinsku barijeru za alat i isto tako mali koeficijent trenja a

time i smanjuje sile rezanja. Tokarenje se treba kada je moguće izvoditi sa karbidnim alatima. Glodanje titanovih legura je teže nego tokarenje ili dubljenje zato što odvojena čestica može prijanjati na alat tijekom perioda kada alat ne reže kod isprekidanog rezanja, što dovodi do napuknuća ili loma alata. Operacije glodanja se često izvode sa nižim brzinama rezanja nego tokarenje ili dubljenje, i često radije sa brzoreznim nego karbidnim alatima. Kada je moguće istosmjerno glodanje se preferira od protusmjernog glodanja sa se smanje napuknuća alata. Kod čeonog glodanja velikih površina, glodalo bi trebalo biti nagnuto tako da prateće rezne oštrice se ne očešaju na obrađenu površinu. Bušenje bi se trebalo izvoditi sa oštrim svrdlima sa velikim kutom nagiba spirale. Sredstva za hlađenje bi se trebala koristiti da se rasprši toplina. Mirovanje svrdla na kraju provrta bi se trebalo izbjegavati. Bolji vijek trajanja alata se postiže sa karbidnim vrhom svrdla nego sa brzoreznim svrdlima. Kada se koriste brzorezna svrdla, kromove ili oksidne prevlake su često efikasne kod smanjenja oštećenja površine [1].

2.5.10. Legure nikla

FCC kristalna struktura je glavno obilježje legura na osnovi nikla. Sa obzirom na tehničku primjenu to znači da kod njih ne dolazi do prijelaza žilavog u krhak prijelom sa sniženjem temperature, pa se mogu nazvati žilavim materijalima [15].

Legure nikla se uglavnom teško obrađuju. Imaju visoku čvrstoću i kovkost i brzo otvrdnjavaju prilikom obrade. Zbog takve kombinacije svojstava, one su podložne mnogim poteškoćama koje se susreću kod obrade austenitnih nehrđajućih čelika.

Karakteristika otvrdnjavanja prilikom obrade je uzrok mnogih poteškoća kod obrade. Kako brzo otvrdnjavaju prilikom obrade, proizvode visoka naprezanja i temperature na alatu, koje mogu ubrzati trošenje alata i dovesti do oštećenja obrađene površine. Do toga dolazi zbog znatnog povećanja sile rezanja i reznih temperatura kao posljedica dugotrajnog kontakta. Uvjete obrade koji uzrokuju veliko vlačno naprezanje na površini izratka trebalo bi uvijek izbjegavati i trebalo bi gdje god je to moguće osigurati tlačno naprezanje. Brzina otvrdnjavanja je najveća za žarene ili toplinski obrađene materijale. Jedna česta metoda poboljšanja obradivosti je kada je moguće hladno deformiranje materijala prije obrade. Efekt otvrdnjavanja prilikom obrade se isto može smanjiti korištenjem oštarih alata s pozitivnim prednjim kutem. Visoki posmaci i dubine rezanja se isto preporučuju za smanjenje oštećenja obrađivane površine koje je uzrokovano pretjeranim zagrijavanjem zbog trenja. Zaostala naprezanja koja se pojavljuju na površini obradka prilikom obrade mogu rezultirati promjenama koja imaju veliki utjecaj na

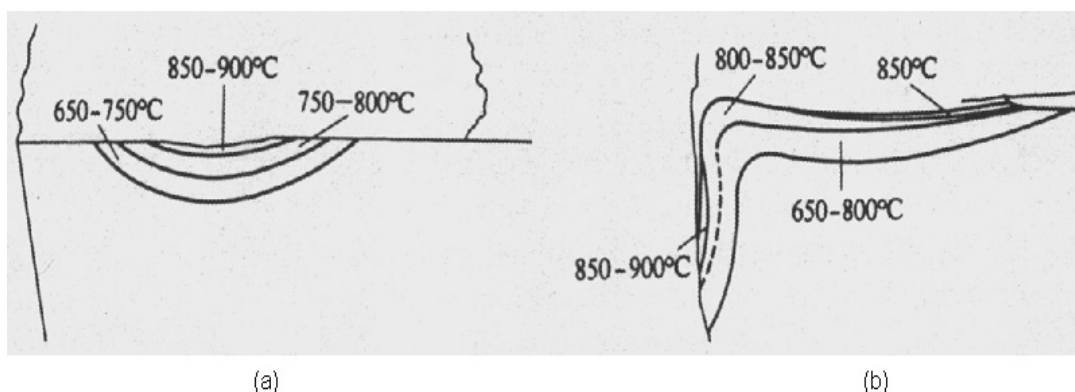
mehanička svojstva i otpornost koroziji izratka. Zbog toga velika se pažnja mora posvetiti očuvanju integriteta površine obradka tijekom obrade [1].

Visoke sile generirane tijekom obrade također mogu dovesti do izobličenja obradka i krzanja. Da se spriječi izobličenje, često je preporučljivo grubo obraditi komade na gotovo točnu dimenziju, ukloniti zaostala naprezanja, i onda slijedi fina obrada.

Mikrostrukturalna svojstva također imaju mali utjecaj na obradivost. Kao kod lijevanog željeza i legiranog čelika, prisutnost grafitnih ili sulfidnih faza u jezgri poboljšava obradivost smanjenjem trenja i poboljšanjem lomljenja odvojene čestice. S druge strane, prisutnost tvrdih faza kao što su karbidi, nitridi, oksidi, i silikati povećava abrazivno trošenje i smanjuje vijek trajanja alata [1].

Rezni alati korišteni za obradu niklovih legura trebali bi imati adekvatnu čvrstoću pri povišenim temperaturama da bi se oduprli, tj. da bi izdržali visoke temperature generirane pri visokobrzinskoj obradi. Pri tim uvjetima većina materijala korištenih za rezne alate uglavnom gubi svoju čvrstoću što rezultira njihovim ubrzanim trošenjem.

Smart i Trent (1975) su dokazali eksperimentalnim putem da kada se obrađuje nikal, najveća temperatura na prednjoj površini alata je na samom vrhu alata. Slika 16. prikazuje izoterme koje se dobivaju kada se obrađuje čelik i nikal. To je dobiveno Wright i Trent-ovom (1973) metodom toplinskog omekšavanja i prikazuje maksimalno dobivene temperature kod obrade čelika i nikla [10].



Slika 16. Presjek HSS alata korištenog kratko vrijeme pri ultra visokoj brzini (30 sek) kako bi se vidjele izoterme. (a) Željezo sa malim udjelom ugljika (152m/min). (b) CP nikal (53 m/min). Posmak 0.25 mm/okr. [10]

Nikal će se teško obrađivati OČ zbog činjenice da maksimalna temperatura na čelu alata bit će upravo na samom njegovom vrhu zbog kombinacije neobično male vrijednosti koeficijenta trenja čela alata ili omjera rezanja ili pak oba faktora [10].

Legure nikla se obično obrađuju visokobrzinskim i karbidnim alatima. Zato što slabo kemijski reagiraju s niklom, oksidna keramika bazirana na Al_2O_3 i alati od kubnog nitrid bora su isto pogodni.

Istraživanja sugeriraju da keramika ojačana viskerima može biti pogodna za te operacije. Kao i kod čelika, generirane visoke temperature rezanja čine alate od nitridne keramike bazirane na Si_3N_4 nepogodnima za obradu niklovih legura. Široka primjena keramičkih alata je sputana činjenicom da mnoge legure nikla kod visokih brzina formiraju nasječenu odvojenu česticu, što učinkovito ograničava maksimalne brzine rezanja koje se mogu upotrijebiti (često ispod 30 m/min).

Karbidni alati se najčešće koriste kod tokarenja. Pozitivni prednji kutevi, veliki radijus vrha pločice, i lomač odvojene čestice na pločici se koriste za sprječavanje formiranja naljepaka, napuknuće alata, i kod problema sa odvojenom česticom. Kvaliteta obrađene površine ovisi o posmaku i dubini rezanja. Povećanje dubine rezanja poboljšava kvalitetu obrađene površine dobivene prevučeni karbidnim alatima i dovodi do pogoršanja kvalitete kada se koriste neprevučeni karbidni alati. Glodanje se često izvodi sa visokobrzinskim glodalima zato što karbidne oštrice imaju tendenciju lomljenja kod isprekidanih operacija. Potrebni su kruti alati i postavke da se održi točnost i izbjegne krzanje. Bušenje za opće namjene se može izvoditi sa visokobrzinskim svrdlima. Kao i kod titanovih legura, treba se spriječiti mirovanje svrdla na kraju provrta. Volframovi karbidi sa visokim udjelom kobalta koji sadrže relativno visoke količine TiC i TaC trebali bi biti najučinkovitiji karbidi za OČ tvrdih legura na bazi nikla [1] [10].

Obradivost oblikovanjem i odvajanjem čestica otežava se porastom stupnja legiranosti pa se legure s najvišim stupnjem legiranosti, kao što su legure s visokim udjelom kobalta, pretežno lijevaju [15].

2.5.11. Legure osiromašenog urana

Legure osiromašenog urana su nusproizvod procesa obogaćivanja kod kojeg se U-235 izdvaja iz prirodnog urana. Mogu se razlikovati tri klase legura: Rijetko legirane legure, koje imaju koncentraciju od 0,4% legiranih elemenata, slabo legirane legure, koje imaju koncentraciju između 0,4 i 4% legiranih elemenata, te nehrđajuće legure, koje imaju koncentraciju veću od 4% legiranih elemenata. Česti

legirni elementi su titan, koji povećava čvrstoću, i niobij, koji povećava otpornost na koroziju.

Iako legure osiromašenog urana zbog mnogo razloga spadaju pod lako obradive, pokazuju nekoliko svojstva materijala koje stvaraju poteškoće kod obrade. To uključuje [1]:

- visoka kovkost, adhezivnost, tendencija guljenju
- abrazivnost
- brzo otvrdnjavanje tijekom obrade
- niski modul elastičnosti
- reagira sa alatima i sredstvima za hlađenje
- piroforni
- anizotropska toplinska ekspanzija
- efekt prisjetljivosti oblika
- toksičnost i radioaktivnost

Pirofornost je tendencija zapaljenja. Legure urana brzo oksidiraju kada se izlože zraku, i mogu generirati samoodržive požare kada se obradom pri malim posmacima dobije tanka odvojena čestica. Za borbu protiv ovog problema, da se smanji temperatura odvojena čestica se obično sakuplja u posude i uranja u sredstvo za hlađenje. Preferiraju se sredstva za hlađenje bazirana na vodi. Mogu se isto koristiti sredstva od mineralnog ulja, ali u tom slučaju požari se moraju ugasiti prije nego što temperatura prijeđe točku zapaljivosti ulja. Oba svojstva, anizotropska toplinska ekspanzija i efekt prisjetljivosti oblika, uvjetuju korištenje oštarih alata, i sredstvo za hlađenje sa reguliranom temperaturom da bi se minimizirale distorzije uzrokovane učinkom topline.

Osiromašeni uran je toksičan i radioaktivan materijal koji može predstavljati ozbiljnu opasnost izlaganju.

Osiromašeni uran se može obrađivati na standardnim CNC alatnim strojevima. Tokarenje, i glodanje bi se trebali izvoditi sa oštrim alatima da se ograniči stvaranje toplina i hladno deformiranje. Uglavnom se koriste karbidni alati. Bušenje se može izvoditi sa karbidnim svrdlima prevučenim sumpornom smjesom za podmazivanje. Spiralni ureznici sa varirajućim kutevima i oksidnim prevlakama se koriste za izradu unutarnjih navoja. Brušenje bi se trebalo izbjegavati ali se kada je

potrebno može izvoditi sa brusnom pločom od silicijeva karbida i sredstva za hlađenje bazirane na vodi [1].

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Cilj i metodologija ispitivanja

Cilj eksperimenta je da se na osnovu dosad objavljenih istraživanja i teorijskih saznanja pronađe funkcija obradivosti (adekvatni matematički model), koja bi opisivala uzajamnu ovisnost ulaznih i izlaznih parametara procesa obrade i koja predstavlja aproksimaciju stvarnog, nepoznatog, analitičkog oblika funkcije procesa.

U ovom eksperimentu analizira se karakter utjecaja parametara režima obrade (dubina rezanja a_p , posmak f i brzina rezanja v_c) na sile rezanja (glavnu silu rezanja F_c , posmičnu silu rezanja F_t , natražnu silu rezanja F_p) kod uzdužnog tokarenja. Eksperiment se vrši na čeliku za poboljšavanje i nakon toga rezultati će se usporediti sa rezultatima koji su dobiveni kod čelika za cementiranje.

U ovom radu postavljen je zadatak da se adekvatni matematički model dobije pomoću višefaktorskog plana pokusa, koji se pokazao optimalnim za istraživanje matematičkih modela koji opisuju zakonitosti u procesu obrade odvajanjem čestica.

Za ulazne nezavisne veličine procesa odabrani su:

- dubina rezanja
- posmak
- brzina rezanja

Za ispitivani slučaj to znači utvrđivanje zakonitosti:

$$F_i = f_i(v_c, a_p, f) \quad (24)$$

Rezultati istraživanja i iz njih proizlazeći modeli, dati će fizikalnu sliku o karakteru utjecaja parametara obrade na sile rezanja.

3.2. Planiranje i priprema eksperimentalnih istraživanja

3.2.1. Karakteristike stroja

Eksperimentalna istraživanja provedena su na tokarskom obradnom centru Trens SBL-500, proizvedenom 2004. godine (slika 17).



Slika 17. Tokarski obradni centar Trens SBL-500 [16]

Tehničke karakteristike tokarskog obradnog centra Trens SBL-500 su [16]:

- Dimenzije: 1738 x 1900 mm (širina x visina)
- Težina: 6620 kg
- Radni prostor:
 - najveća duljina tokarenja: 845 mm
 - najveći promjer tokarenja iznad kliznih staza: 405 mm
- Brzina posmičnih gibanja:
 - radna brzina za X os: 1÷10 m/min,
 - radna brzina za Z os: 1÷10 m/min,
 - pozicioniranje za X os: 18 m/min,
 - pozicioniranje za Z os: 24 m/min
- Glavno vreteno:
 - frekvencija vrtnje: 4200 o/min,
 - snaga: 18,5 KW,
 - "C" os za indeksiranje glavnog vretena

- Magazin alata: - broj mjesta u revolverskoj glavi (SAUTER): 12 (6+6)
 - prihvata pogonjenog alata
 - snaga pogonjenih alata: 3,0 kW
 - frekvencija vrtnje: 3500 o/min
- Transporter strugotine za automatski odvoz strugotine
- Upravljanje: SIEMENS 810 D SHOPTURN



Slika 18. Radni prostor tokarskog obradnog centra Trens SBL-500

3.2.2. Materijal obradka

Istraživanja su provedena na čeliku za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431) i čeliku za cementiranje 16MnCr5 (Č4320).

Tablica 4. Kemijski sastav materijala 34CrNiMo6 (Č 5431)

| C % | Si % | Mn % | P % | S % | Cu % | Ni % | Cr % | Mo % | Tvrdoća (HB) |
|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|
| 0,39 | 0,16 | 0,45 | 0,010 | 0,018 | 0,13 | 1,50 | 1,46 | 0,15 | 300 |

Tablica 5. Kemijski sastav materijala 16MnCr5 (Č4320)

| C % | Mn % | Cr % | P % | S % | Si % | Cu % | Ni % | Tvrdoća (HB) |
|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|
| 0,168 | 1,125 | 0,968 | 0,010 | 0,026 | 0,077 | 0,069 | 0,031 | 160 |

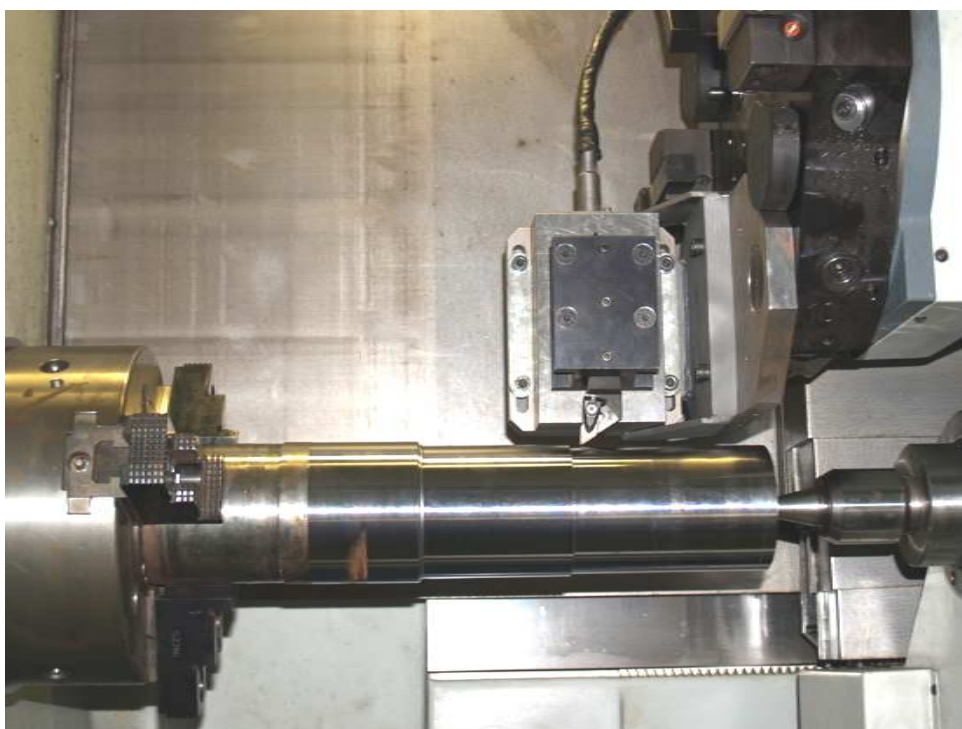
3.2.3. Mjerni instrument

Za mjerenje sile rezanja korišten je trokomponentni mjerač sila tipa 9257B, švicarskog proizvođača "KISTLER". Radi se o električnom mjeraču s piezoelektričnim pretvornikom.

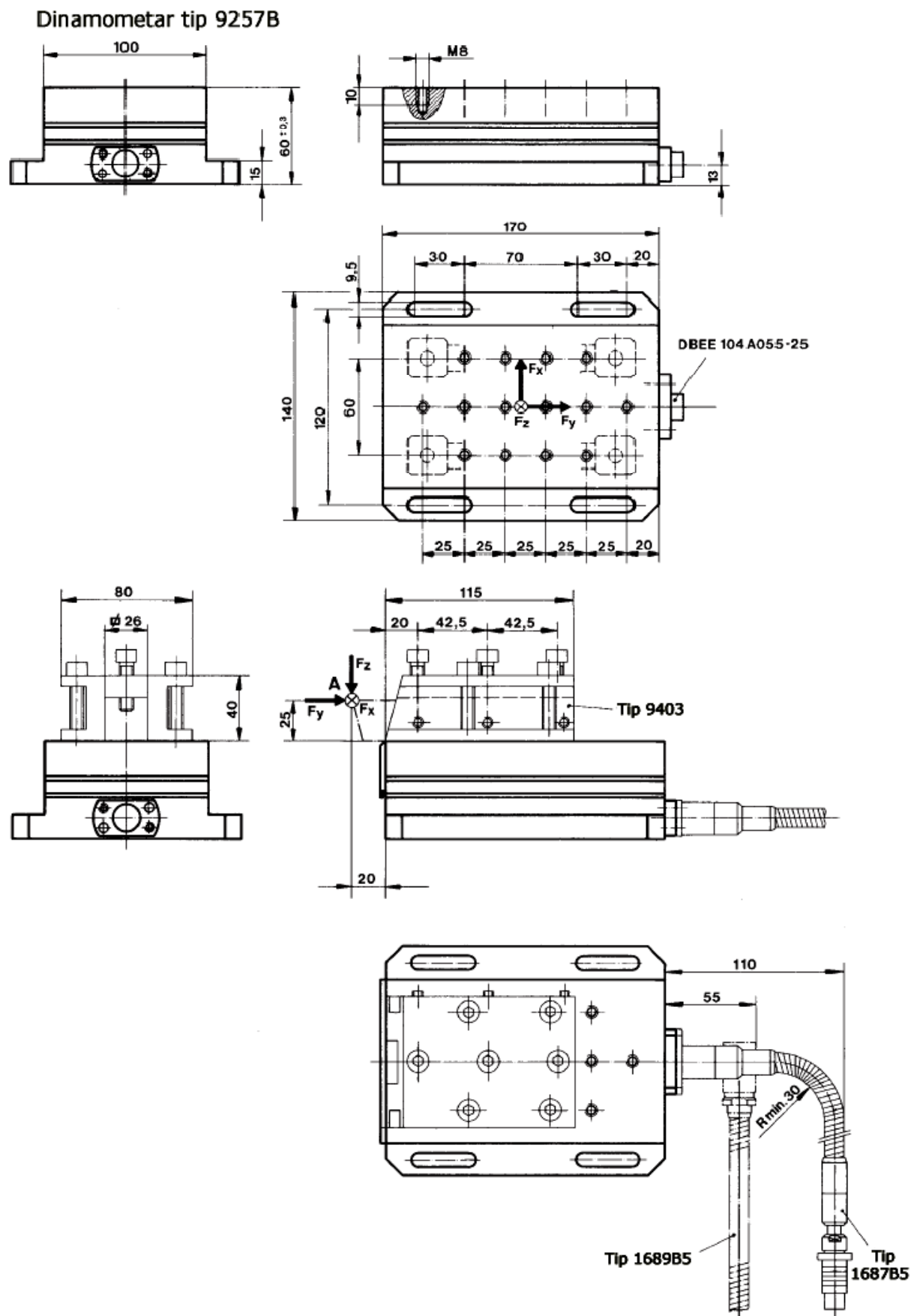
Osnovne karakteristike samog uređaja su:

- područje mjerenja sila: $\pm 5 \text{ kN}$
- preopterećenje: $\pm 7.5 \text{ kN}$; $-7.5/15 \text{ kN}$ za F_z
- krutost: $c_x, c_y > 1 \text{ kN}/\mu\text{m}$; $c_z > 2 \text{ kN}/\mu\text{m}$
- temperaturno područje rada: $0^\circ\text{C} - 70^\circ\text{C}$
- težina: 7.3 kg

Dinamometar se sastoji od četiri senzora za mjerenje tri komponente sile rezanja, a smješteni su između osnovne ploče i gornje ploče. Svaki senzor sadrži tri para kremenih ploča, jednu osjetljivu na pritisak u smjeru osi z, a druge dvije odgovaraju na smik u smjeru x i y osi. Izlazi iz četiri ugrađena senzora sila su povezana izvan dinamometra u smjeru koji dopušta višekomponentna mjerna oprema. Držač alata koji se montira na mjerni uređaj može prihvatiti alat s maksimalnim dimenzijama drške $26 \times 26 \text{ mm}$. Slika 20 prikazuje presjek uređaja.



Slika 19. Obradak, alat i dio mjernog uređaja sa senzorima



Slika 20. Prikaz uređaja za mjerenje sila [17]

3.3. Rezultati eksperimenta

3.3.1. Rezultati eksperimenta za 34CrNiMo6 (Č5431)

Tablica 6. Rezultati mjerenja sila rezanja na tokarskom obradnom centru Trens SBL-500 čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6.

| Redni broj mjerenja | Ulazni faktori | | | Rezultati mjerenja | | |
|------------------------|----------------|---------------|-------------|--------------------|--------------|--------------|
| | v_c [m/s] | a_p [mm] | f [mm] | F_c [N] | F_f [N] | F_p [N] |
| 1. | 3 | 1 | 0,12 | 331 | 159 | 97 |
| 2. | 6 | 1 | 0,12 | 315 | 147 | 98 |
| 3. | 3 | 2,4 | 0,12 | 805 | 472 | 91 |
| 4. | 6 | 2,4 | 0,12 | 752 | 448 | 89 |
| 5. | 3 | 1 | 0,24 | 548 | 261 | 145 |
| 6. | 6 | 1 | 0,24 | 520 | 244 | 141 |
| 7. | 3 | 2,4 | 0,24 | 1407 | 740 | 137 |
| 8. | 6 | 2,4 | 0,24 | 1335 | 684 | 129 |
| 9. | 4,5 | 1,7 | 0,18 | 758 | 368 | 110 |
| 10. | 4,5 | 1,7 | 0,18 | 740 | 372 | 112 |
| 11. | 4,5 | 1,7 | 0,18 | 739 | 343 | 107 |
| 12. | 4,5 | 1,7 | 0,18 | 746 | 359 | 109 |

Rezultati pokusa za glavnu silu rezanja F_c za čelik 34CrNiMo6.

Polazni matematički model za F_c glasi:

$$F_c = C_1 \cdot v_c^{p_1} \cdot a_p^{p_2} \cdot f^{p_3} \quad (25)$$

Rezultati obrađenih podataka dobivenih pokusom i obrađeni u programskom paketu Statistica v7.0. pokazani su u tablici 7. Vidljivo je da su svi članovi modela signifikantni.

Tablica 7. Vrijednosti parametara matematičkog modela za glavnu silu rezanja F_c

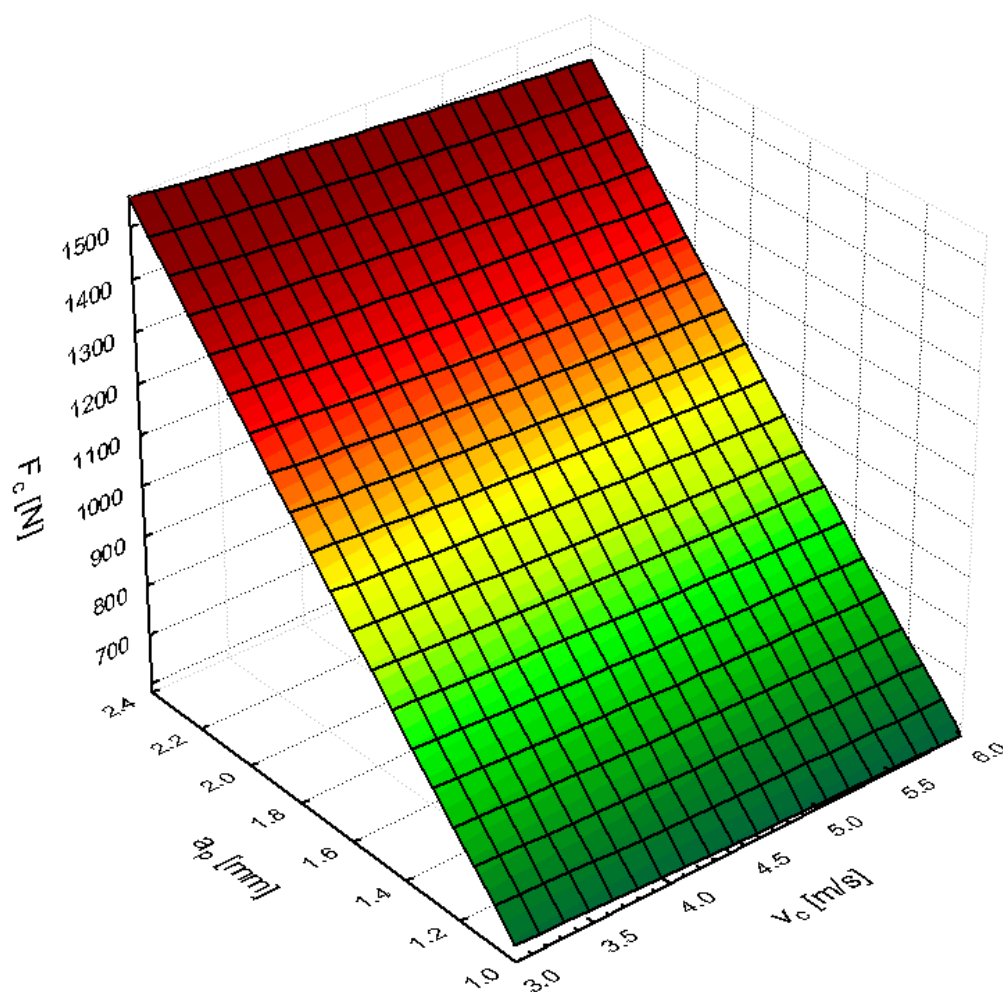
| | Procjena | Standardna greška | t-vrijednost | Razina signifikantnosti |
|-------------------------|----------|-------------------|--------------|-------------------------|
| C_1 | 2668,548 | 193,0018 | 13,82654 | 0,000001 |
| p_1 | -0,081 | 0,0122 | -6,63847 | 0,000163 |
| p_2 | 1,062 | 0,0133 | 80,08744 | 0,000000 |
| p_3 | 0,805 | 0,0140 | 57,55189 | 0,000000 |

Koeficijent korelacije iznosi: $r = 0,9996633$

Ako uvrstimo dobivene vrijednosti u matematički model dobiva se konačni izraz za traženu vrijednost glavne sile rezanja F_c :

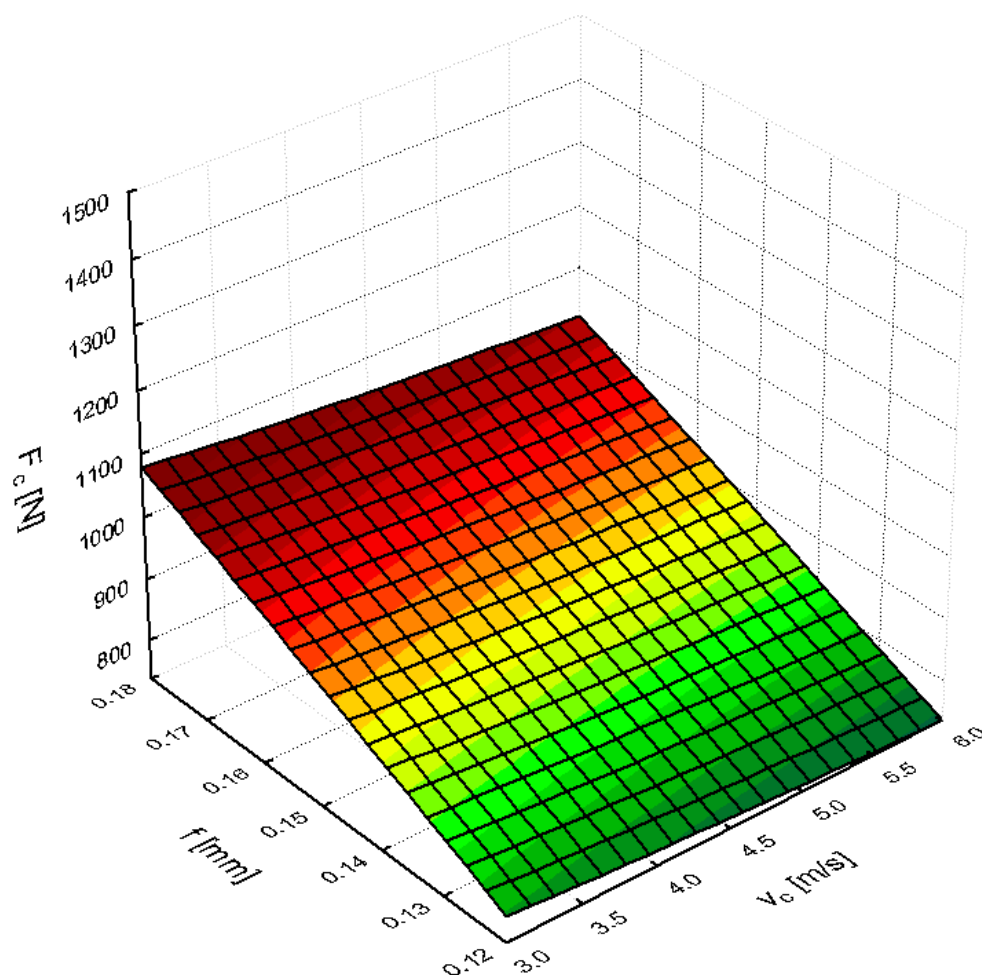
$$F_c = 2668,548 \cdot v_c^{(-0,081)} \cdot a_p^{1,062} \cdot f^{0,805} \quad (26)$$

Na dijagramu na slici 21. primjetno je da se pri promjeni brzine rezanja v_c iznos glavne sile rezanja F_c ne mijenja značajno tj. s porastom brzine rezanja v_c , dolazi do laganog pada iznosa glavne sile rezanja F_c . Očito je da najveći utjecaj na promjenu iznosa glavne sile rezanja F_c ima dubina rezanja a_p tj. s povećanjem dubine rezanja a_p iznos glavne sile rezanja F_c značajno raste.



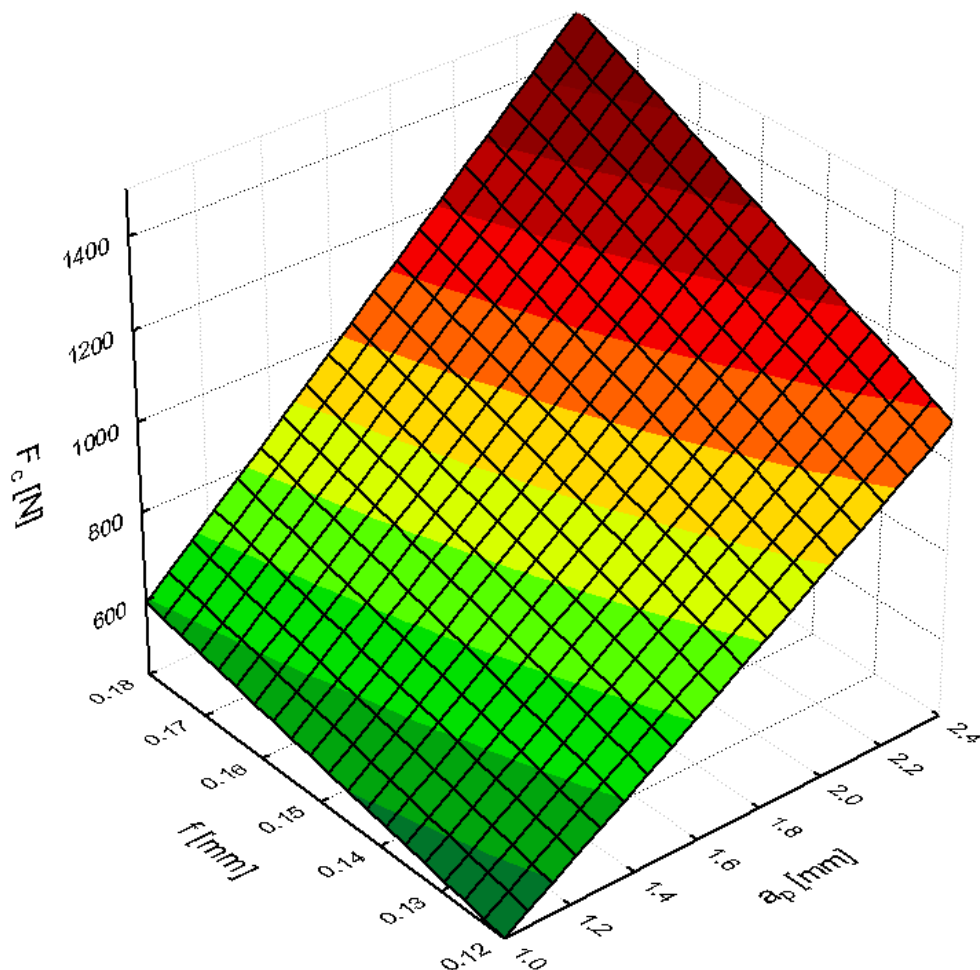
Slika 21. Dijagram ovisnosti $F_c = f(v_c, a_p)$ za $f_{sr} = 0,18$ mm

Na dijagramu na slici 22. također je primjetno da s porastom brzine rezanja v_c , dolazi do laganog pada iznosa glavne sile rezanja F_c . Ovdje najveći utjecaj na promjenu iznosa glavne sile rezanja F_c ima posmak f tj. s povećanjem posmaka f iznos glavne sile rezanja F_c značajno raste.



Slika 22. Dijagram ovisnosti $F_c=f(v_c, f)$ za $a_p=1,7$ mm

Na dijagramu na slici 23. primjetno je, kao što je to prikazano na slici 21. i 22., da s porastom dubine rezanja a_p i posmaka f , iznos glavne sile rezanja F_c značajno raste. Pri tome, na porast glavne sile rezanja F_c , veći utjecaj ima dubina rezanja a_p .



Slika 23. Dijagram ovisnosti $F_c=f(a_p, f)$ za $v_c=4,5$ m/s

Rezultati pokusa za posmičnu silu rezanja F_f za čelik 34CrNiMo6.

Polazni matematički model za F_f glasi:

$$F_f = C_2 \cdot v_c^{p_4} \cdot a_p^{p_5} \cdot f^{p_6} \quad (27)$$

Rezultati obrađenih podataka dobivenih pokusom i obrađeni u programskom paketu Statistica v7.0. pokazani su u tablici 8. Vidljivo je da su svi članovi modela signifikantni.

Tablica 8. Vrijednosti parametara matematičkog modela za posmičnu silu rezanja F_f

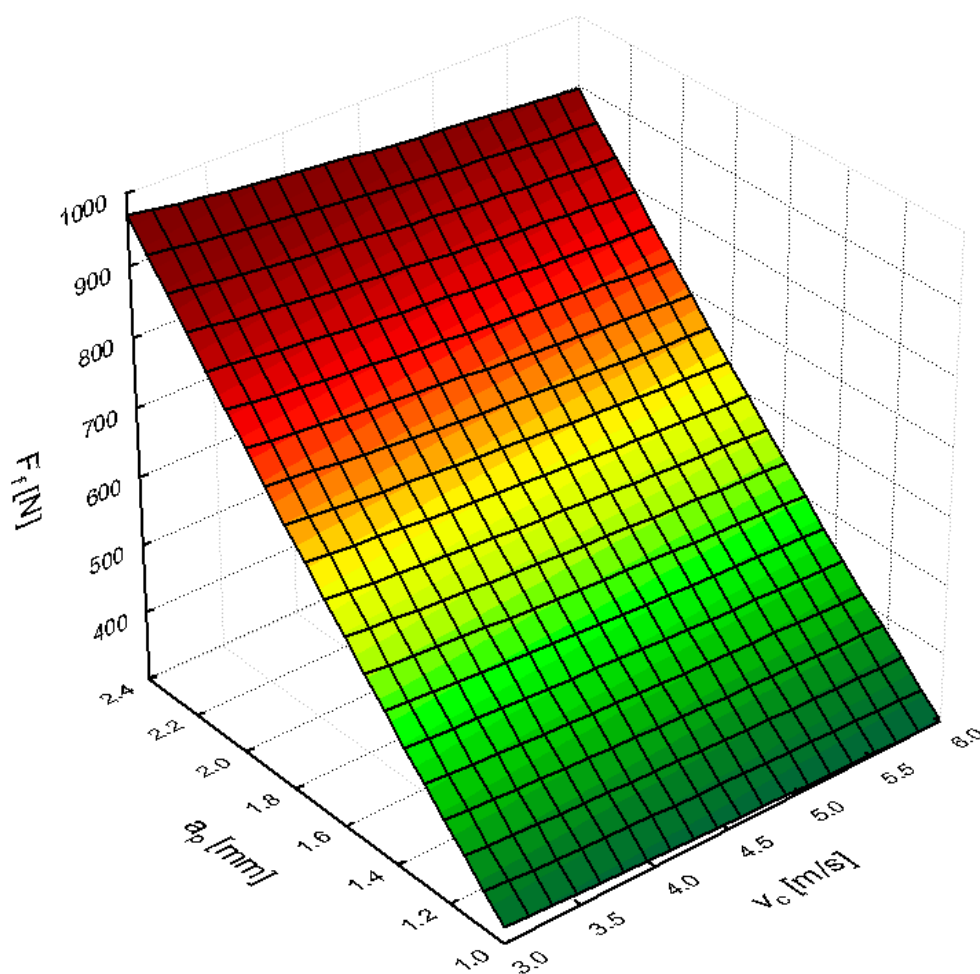
| | Procjena | Standardna greška | t-vrijednost | Razina signifikantnosti |
|-------------------------|----------|-------------------|--------------|-------------------------|
| C_2 | 1116,920 | 271,1892 | 4,11860 | 0,003351 |
| p_4 | -0,113 | 0,0409 | -2,77082 | 0,024266 |
| p_5 | 1,262 | 0,0487 | 25,91678 | 0,000000 |
| p_6 | 0,654 | 0,0450 | 14,54010 | 0,000000 |

Koeficijent korelacije iznosi: $r = 0,99659624$

Ako uvrstimo dobivene vrijednosti u matematički model dobiva se konačni izraz za traženu vrijednost posmične sile rezanja F_f :

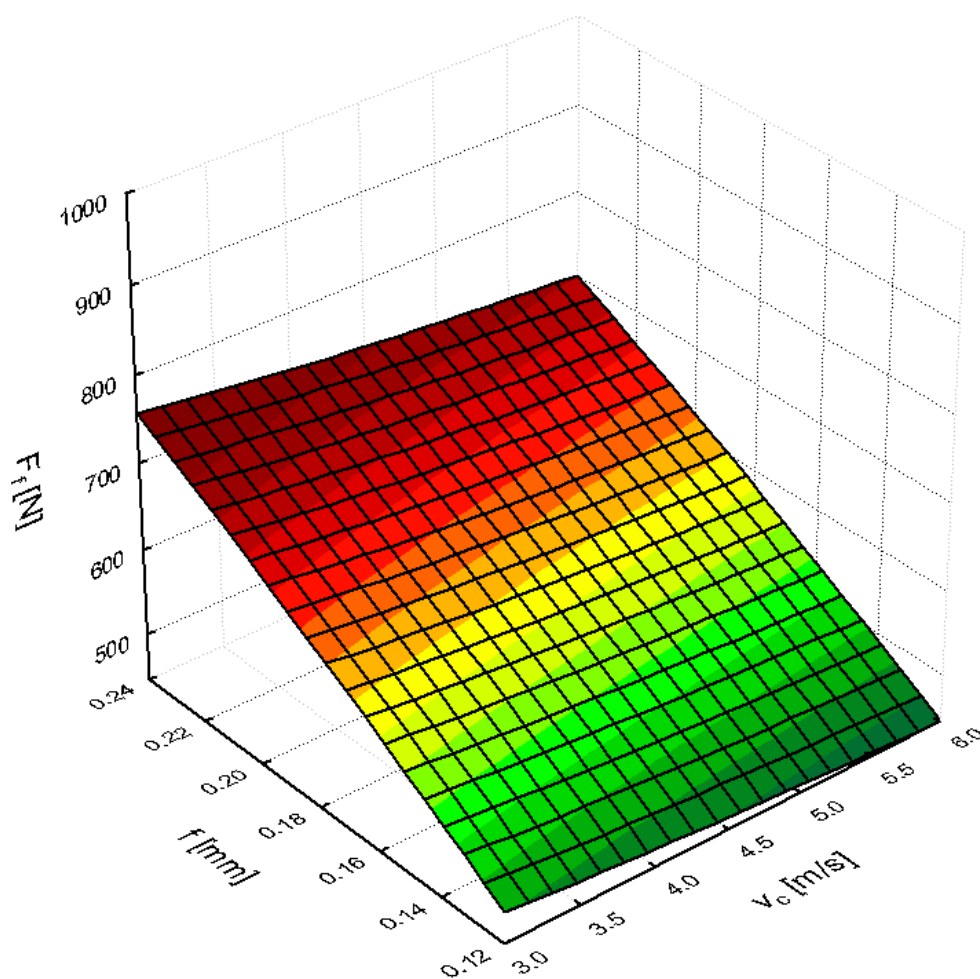
$$F_f = 1116,920 \cdot v_c^{(-0,113)} \cdot a_p^{1,262} \cdot f^{0,654} \quad (28)$$

Na dijagramu na slici 24. primjetno je da se pri promjeni brzine rezanja v_c iznos posmične sile rezanja F_T ne mijenja značajno tj. s porastom brzine rezanja v_c , dolazi do laganog pada iznosa posmične sile rezanja F_T . Očito je da najveći utjecaj na promjenu iznosa posmične sile rezanja F_T ima dubina rezanja a_p tj. s povećanjem dubine rezanja a_p iznos posmične sile rezanja F_T značajno raste.



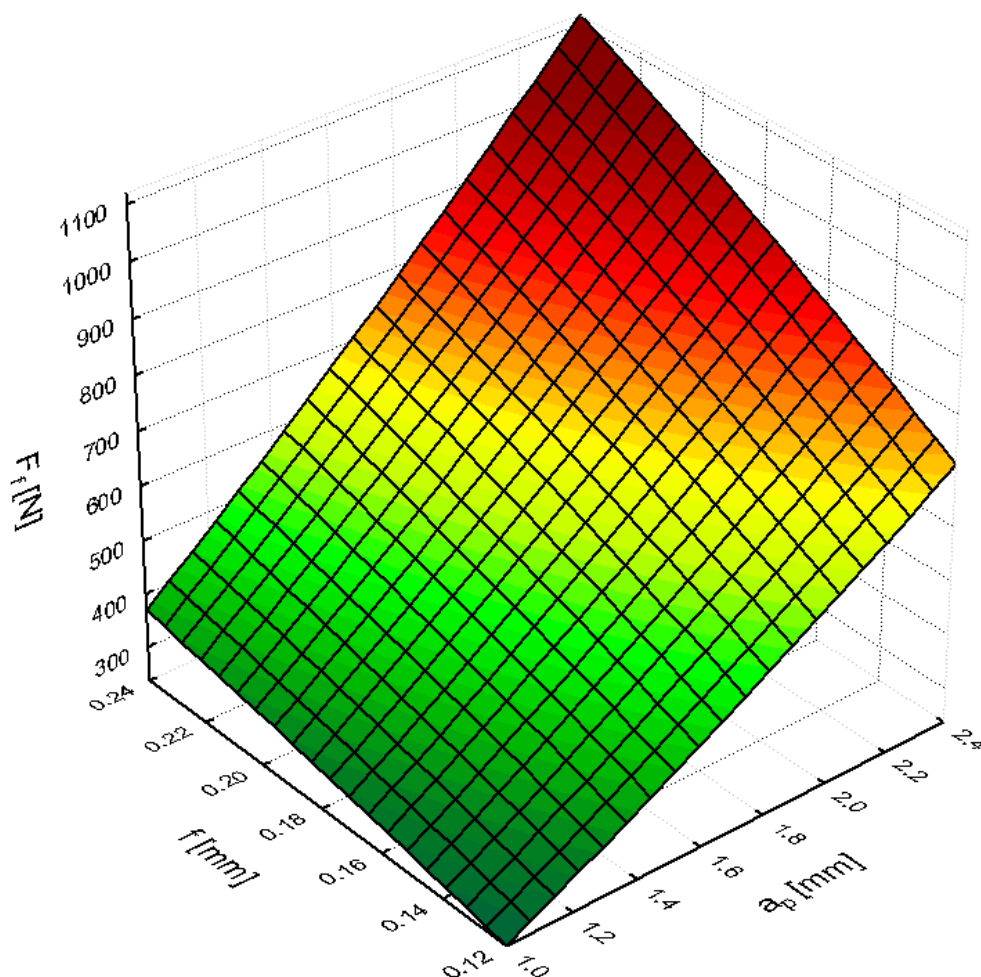
Slika 24. Dijagram ovisnosti $F_T=f(v_c, a_p)$ za $f_{sr}=0,18$ mm

Na dijagramu na slici 25. također je primjetno da s porastom brzine rezanja v_c , dolazi do laganog pada iznosa posmične sile rezanja F_f , ali ipak u većoj mjeri nego glavna sila rezanja F_c na slici 22. i ovdje najveći utjecaj na promjenu iznosa posmične sile rezanja F_f ima posmak f tj. S povećanjem posmaka f iznos posmične sile rezanja F_f značajno raste.



Slika 25. Dijagram ovisnosti $F_f=f(v_c, f)$ za $a_p=1,7$ mm

Na dijagramu na slici 26. primjetno je, kao što je to prikazano na slici 24. i 25., da s porastom dubine rezanja a_p i posmaka f , iznos posmične sile rezanja F_f značajno raste. Pri tome, na porast posmične sile rezanja F_f , veći utjecaj ima dubina rezanja a_p .



Slika 26. Dijagram ovisnosti $F_f = f(a_p, f)$ za $v_c = 4,5$ m/s

Rezultati pokusa za natražnu silu rezanja F_p za čelik 34CrNiMo6.

Polazni matematički model za F_p glasi:

$$F_p = C_3 \cdot v_c^{p_7} \cdot a_p^{p_8} \cdot f^{p_9} \quad (29)$$

Rezultati obrađenih podataka dobivenih pokusom i obrađeni u programskom paketu Statistica v7.0. pokazani su u tablici 9. Vidljivo je da brzina rezanja nije signifikantna.

Tablica 9. Vrijednosti parametara matematičkog modela za natražnu silu rezanja F_p

| | Procjena | Standardna greška | t-vrijednost | Razina signifikantnosti |
|-------------------------|----------|-------------------|--------------|-------------------------|
| C_3 | 433,9046 | 93,76267 | 4,62769 | 0,001693 |
| p_7 | -0,0552 | 0,03715 | -1,48494 | 0,175859 |
| p_8 | -0,0973 | 0,02929 | -3,32298 | 0,010493 |
| p_9 | 0,5704 | 0,04002 | 14,25101 | 0,000001 |

Koeficijent korelacije iznosi: $r = 0,98281276$

Rezultati obrađenih podataka dobivenih pokusom i obrađeni u programskom paketu Statistica v7.0. pokazani su u tablici 10. Vidljivo je da su svi članovi modela signifikantni.

Tablica 10. Vrijednosti parametara matematičkog modela za natražnu silu rezanja F_p

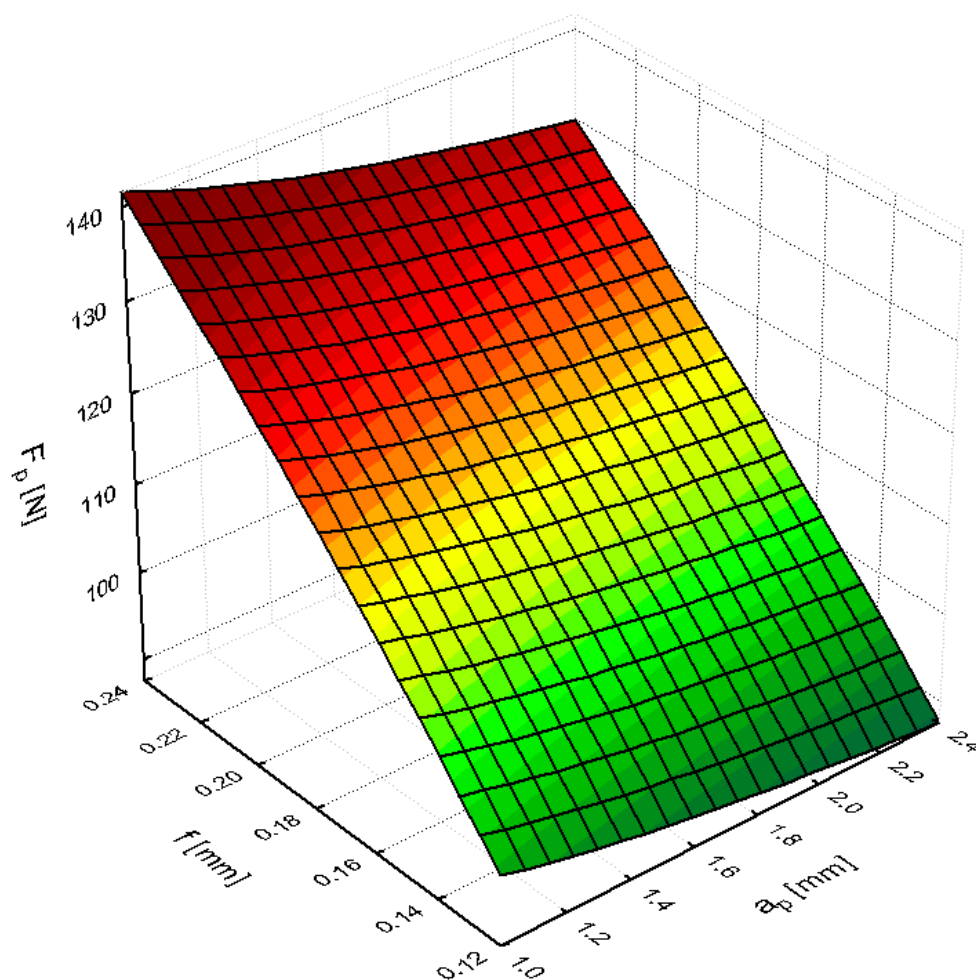
| | Procjena | Standardna greška | t-vrijednost | Razina signifikantnosti |
|----------------------|----------|-------------------|--------------|-------------------------|
| C₃ | 319,6516 | 23,29558 | 13,72156 | 0,000000 |
| p₈ | -0,0985 | 0,03115 | -3,16157 | 0,011521 |
| p₉ | 0,5706 | 0,04257 | 13,40313 | 0,000000 |

Koeficijent korelacije iznosi: $r = 0,97811929$

Ako uvrstimo dobivene vrijednosti u matematički model dobiva se konačni izraz za traženu vrijednost natražne sile rezanja F_p :

$$F_p = 319,6516 \cdot a_p^{(-0,0985)} \cdot f^{0,5706} \quad (30)$$

Na dijagramu na slici 27. primjetno je da s porastom dubine rezanja a_p dolazi do laganog pada iznosa natražne sile rezanja F_p . Ovdje najveći utjecaj na promjenu iznosa natražne sile rezanja F_p ima posmak f tj. s povećanjem posmaka f iznos natražne sile rezanja F_p značajno raste.



Slika 27. Dijagram ovisnosti $F_p = f(a_p, f)$ za $v_c = 4,5$ m/s

3.3.2. Usporedba rezultata eksperimenta dobivenih za čelik za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431) i čelik za cementiranje 16MnCr5 (Č4320)

Tablica 11. Rezultati mjerenja sila rezanja na tokarskom obradnom centru Trens SBL-500 čelika za cementiranje 16MnCr5

| Redni broj mjerenja | Ulazni faktori | | | Rezultati mjerenja | | |
|---------------------|----------------|---------------|-------------|--------------------|--------------|--------------|
| | v_c [m/s] | a_p [mm] | f [mm] | F_c [N] | F_f [N] | F_p [N] |
| 1. | 3 | 1 | 0,12 | 301 | 165 | 96 |
| 2. | 6 | 1 | 0,12 | 277 | 144 | 86 |
| 3. | 3 | 2,4 | 0,12 | 718 | 461 | 87 |
| 4. | 6 | 2,4 | 0,12 | 659 | 402 | 78 |
| 5. | 3 | 1 | 0,24 | 557 | 254 | 150 |
| 6. | 6 | 1 | 0,24 | 511 | 221 | 134 |
| 7. | 3 | 2,4 | 0,24 | 1327 | 710 | 136 |
| 8. | 6 | 2,4 | 0,24 | 1218 | 619 | 122 |
| 9. | 4,5 | 1,7 | 0,18 | 691 | 361 | 107 |
| 10. | 4,5 | 1,7 | 0,18 | 703 | 374 | 113 |
| 11. | 4,5 | 1,7 | 0,18 | 687 | 356 | 112 |
| 12. | 4,5 | 1,7 | 0,18 | 694 | 364 | 108 |

Rezultati pokusa za glavnu silu rezanja F_c za čelik 16MnCr5.

Polazni matematički model za F_c glasi:

$$F_c = C_1 \cdot v_c^{p_1} \cdot a_p^{p_2} \cdot f^{p_3} \quad (31)$$

Rezultati obrađenih podataka dobivenih pokusom i obrađeni u programskom paketu Statistica v7.0. pokazani su u tablici 12.

Tablica 12. Vrijednosti parametara matematičkog modela za glavnu silu rezanja F_c

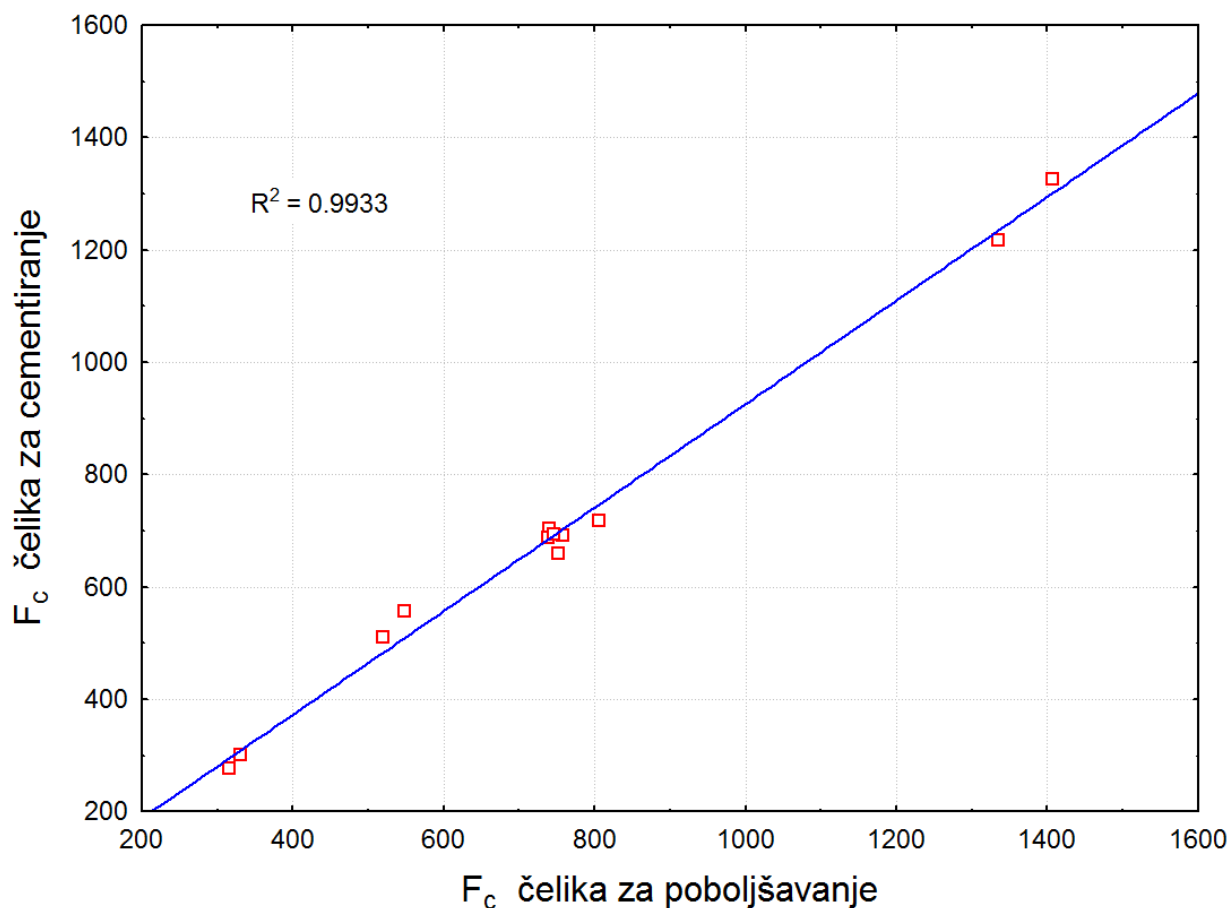
| | Procjena | Standardna greška | t-vrijednost | Razina signifikantnosti |
|-------------------------|----------|-------------------|--------------|-------------------------|
| C_1 | 3752,713 | 120,6000 | 31,1170 | 0,000000 |
| p_1 | -0,124 | 0,0054 | -22,7450 | 0,000000 |
| p_2 | 0,993 | 0,0057 | 173,2707 | 0,000000 |
| p_3 | 0,887 | 0,0064 | 139,0288 | 0,000000 |

Koeficijent korelacije iznosi: $r = 0,99993304$

Ako uvrstimo dobivene vrijednosti u matematički model dobiva se konačni izraz za traženu vrijednost glavne sile rezanja F_c :

$$F_c = 3752,713 \cdot v_c^{(-0,124)} \cdot a_p^{0,993} \cdot f^{0,887} \quad (32)$$

Graf na slici 28. pokazuje da su rasipanja rezultata minimalna. Može se primijetiti da su izmjerene vrijednosti sila rezanja za čelika za cementiranje 16MnCr5 neznatno niže nego za čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6.



Slika 28. Usporedba eksperimentalnih vrijednosti za glavnu silu rezanja F_c dobivenu kod obrade čelika za cementiranje 16MnCr5 i čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6

Rezultati pokusa za posmičnu silu rezanja F_f za čelik 16MnCr5.

Polazni matematički model za F_f glasi:

$$F_f = C_2 \cdot v_c^{p_4} \cdot a_p^{p_5} \cdot f^{p_6} \quad (33)$$

Rezultati obrađenih podataka dobivenih pokusom i obrađeni u programskom paketu Statistica v7.0. pokazani su u tablici 13.

Tablica 13. Vrijednosti parametara matematičkog modela za posmičnu silu rezanja F_f

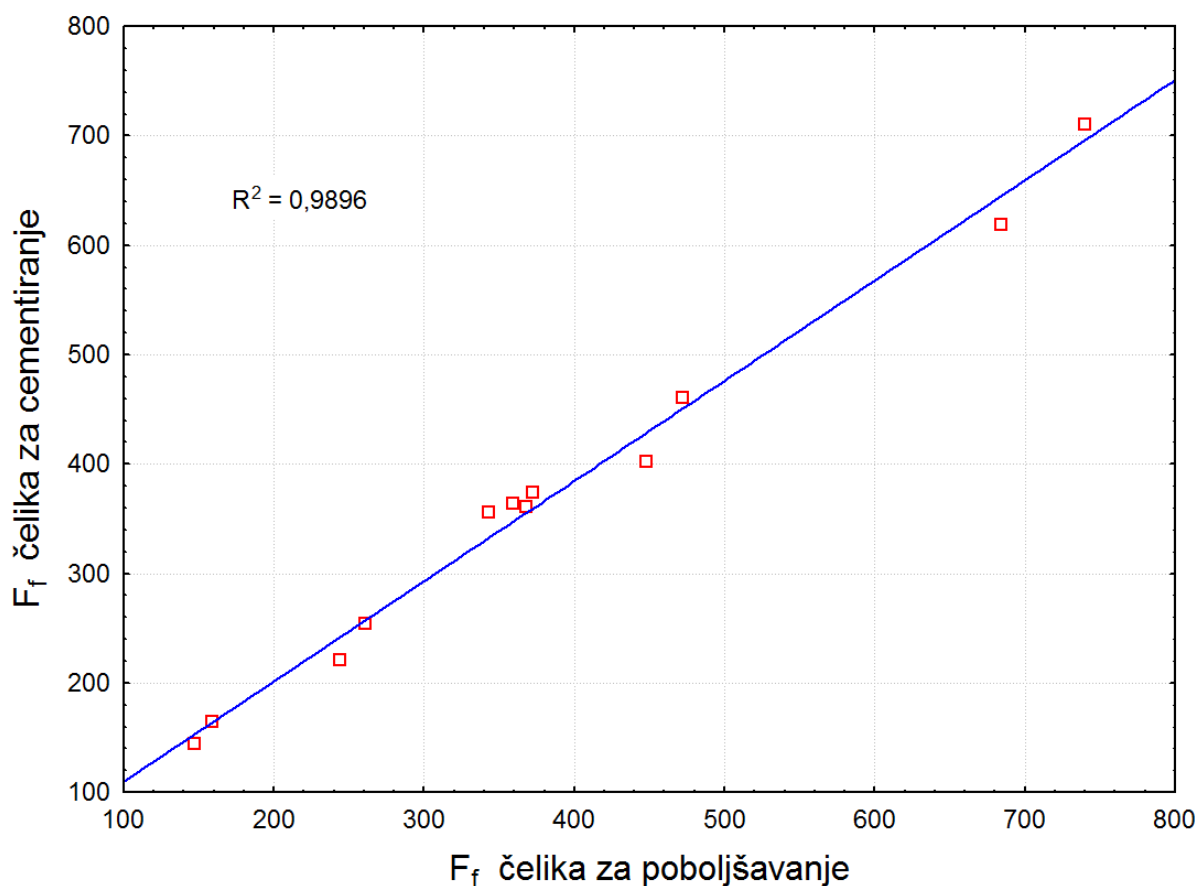
| | Procjena | Standardna greška | t-vrijednost | Razina signifikantnosti |
|-------------------------|----------|-------------------|--------------|-------------------------|
| C_2 | 1730,656 | 116,8379 | 14,8125 | 0,000000 |
| p_4 | -0,199 | 0,0114 | -17,3899 | 0,000000 |
| p_5 | 1,178 | 0,0130 | 90,3055 | 0,000000 |
| p_6 | 0,623 | 0,0124 | 50,1187 | 0,000000 |

Koeficijent korelacije iznosi: $r = 0,99971713$

Ako uvrstimo dobivene vrijednosti u matematički model dobiva se konačni izraz za traženu vrijednost posmične sile rezanja F_f :

$$F_f = 1730,656 \cdot v_c^{(-0,188)} \cdot a_p^{1,178} \cdot f^{0,623} \quad (34)$$

Graf na slici 29. pokazuje nešto veća rasipanja vrijednosti rezultata, pogotovo pri većim vrijednostima sila. Isto se može primijetiti da su izmjerene vrijednosti sila rezanja za čelik za cementiranje 16MnCr5 neznatno nižih vrijednosti nego za čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6.



Slika 29. Usporedba eksperimentalnih vrijednosti za posmičnu silu rezanja F_f dobivenu kod obrade čelika za cementiranje 16MnCr5 i čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6

Rezultati pokusa za natražnu silu rezanja F_p za čelik 16MnCr5.

Polazni matematički model za F_p glasi:

$$F_p = C_3 \cdot v_c^{p_7} \cdot a_p^{p_8} \cdot f^{p_9} \quad (35)$$

Rezultati obrađenih podataka dobivenih pokusom i obrađeni u programskom paketu Statistica v7.0. pokazani su u tablici 14.

Tablica 14. Vrijednosti parametara matematičkog modela za natražnu silu rezanja F_p

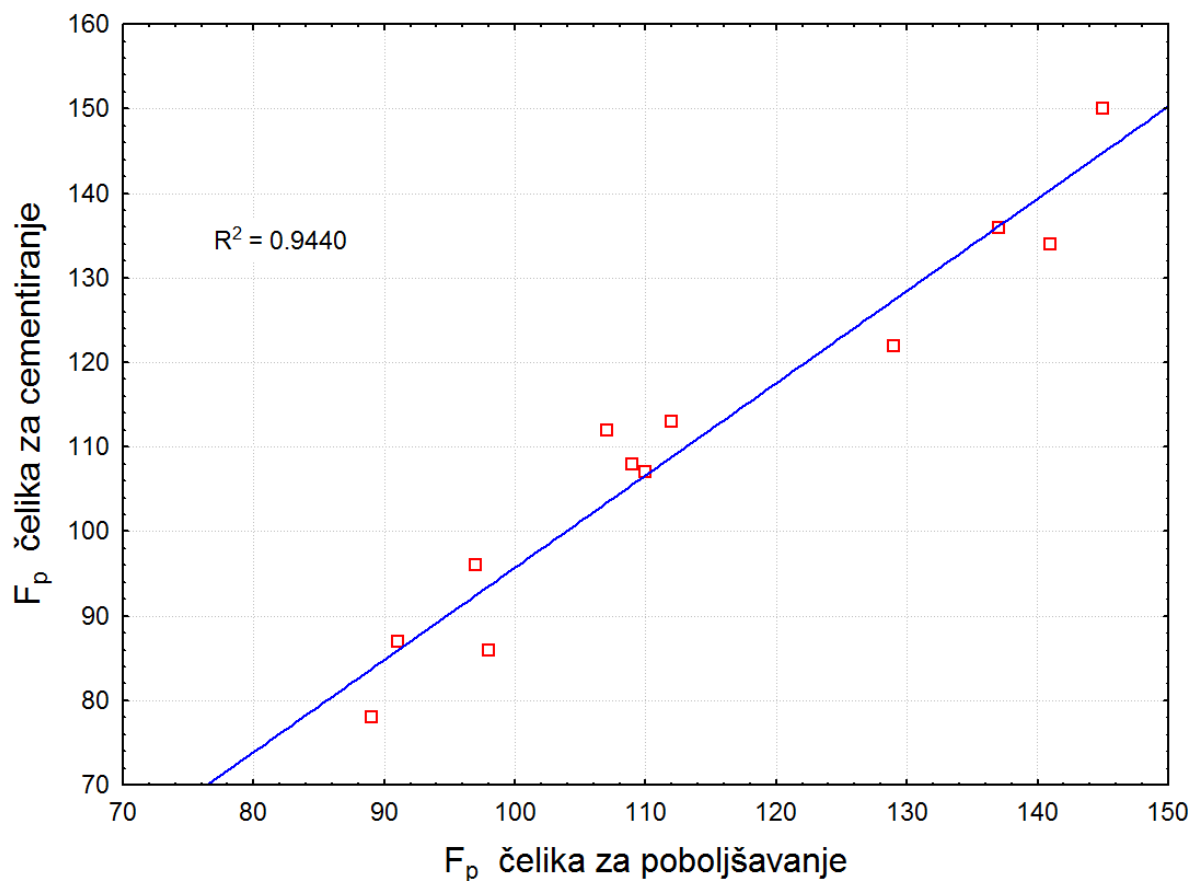
| | Procjena | Standardna greška | t-vrijednost | Razina signifikantnosti |
|-------------------------|-----------|-------------------|--------------|-------------------------|
| C_3 | 860,10127 | 80,10127 | 10,74582 | 0,000005 |
| p_7 | -0,1597 | 0,01608 | -9,93445 | 0,000009 |
| p_8 | -0,1107 | 0,01268 | -8,72817 | 0,000023 |
| p_9 | 0,6436 | 0,01761 | 36,54882 | 0,000000 |

Koeficijent korelacije iznosi: $r = 0,99754928$

Ako uvrstimo dobivene vrijednosti u matematički model dobiva se konačni izraz za traženu vrijednost natražne sile rezanja F_p :

$$F_p = 860,10127 \cdot v_c^{(-0,1597)} \cdot a_p^{(-0,1107)} \cdot f^{0,6436} \quad (36)$$

Graf na slici 30. pokazuje najveća rasipanja vrijednosti rezultata. Isto se može primijetiti da su izmjerene vrijednosti sila rezanja za čelik za cementiranje 16MnCr5 neznatno nižih vrijednosti nego za čelik za poboljšavanje 34CrNiMo6.



Slika 30. Usporedba eksperimentalnih vrijednosti za natražnu silu rezanja F_p dobivenu kod obrade čelika za cementiranje 16MnCr5 i čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6

4. ZAKLJUČAK

Obradivost materijala ne određuje jedan univerzalni već više parcijalnih kriterija obradivosti. Obradivost je bolja što je veći broj kriterija ili funkcija obradivosti postiglo veći pozitivni utjecaj. Moguće je da ti rezultati budu potpuno oprečni.

Rezultati usporedbe sila rezanja između čelika za cementiranje 16MnCr5 (Č4320) i čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431) pokazuju vrlo visoki koeficijent korelacije rezultata. Rasipanja rezultata najmanja su kod glavne sile rezanja a najveća kod natražne sile rezanja. Može se primijetiti da su iznosi sila rezanja kod čelika za cementiranje 16MnCr5 (Č4320) nešto nižih vrijednosti nego kod čelika za poboljšavanje 34CrNiMo6 (Č5431).

Dobivena razlika u iznosima sila rezanja prvenstveno proizlazi iz različitih kemijskih sastava ispitivanih čelika navedenih u tablici 4. i 5. i mehaničkih svojstva.

Veći udio silicija u čeliku za poboljšavanje je vjerojatno jedan od glavnih uzroka razlike u tvrdoći, dok oba čelika imaju isti udio fosfora. Udio sumpora od 0,018 % u čeliku za poboljšavanje u odnosu na 0,026 % u čeliku za cementiranje ne uzrokuje razliku u obradivosti. Veći udio nikla kod čelika za poboljšavanje povećava njegovu čvrstoću, ali i žilavosti pri niskim temperaturama. Krom tvori tvrde karbide ali njegov udio od 1,46 % u čeliku za poboljšavanje u odnosu na 0,968 % u čeliku za cementiranje predstavlja razliku koja je premala da bi imala veći utjecaj na njihovu razliku u obradivosti. Sadržaj ugljika od 0,168 % u čeliku za cementiranje uzrokuje da njegov veći sadržaj mangana, u odnosu na čelik za poboljšavanje, povoljno utječe na njegovu obradivost. Razlika u sadržaju ugljika, kojeg u čelik za poboljšavanje ima 0,39 %, je najviše odgovorna za razliku u obradivosti između ta dva čelika. Porastom udjela ugljika raste tvrdoća, granica razvlačenja i vlačna čvrstoća, ali se smanjuje istežljivost, suženje poprečnog presjeka i udarna radnja loma. S porastom masenog udjela ugljika opada sposobnost čelika za plastičnu deformaciju. Razlog tome je povišenje udjela tvrdog i krhkog cementita u mikrostrukтури s porastom masenog udjela ugljika.

LITERATURA

- [1] Stephenson, David A. : Metal cutting theory and practice, Second edition, CRC Press, Boca Raton, 2006.
- [2] Cebalo, Roko: Obrada odvajanjem čestica (Podsjetnik za ispit), FSB, Zagreb, 1996.
- [3] Ekinović, S. : Obrada rezanjem, Dom štampe, Zenica, 2001.
- [4] Škorić, Stephan: Istraživanje pogodnosti obrade ortogonalnim okruglim glodanjem, Doktorska dizertacija, FSB, Zagreb, 2002.
- [5] Šavar, Šime: Obrada odvajanjem čestica, I dio, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1977.
- [6] <http://www.fsb.hr/kas>, Pristupljeno 14.02.2011.
- [7] Stanić J., Kalajdžić M., Kovačević R. : Merna tehnika u tehnologiji obrade metala rezanjem, IRO Građevinska knjiga, Beograd 1983.
- [8] Škorić, Stephan: Modeliranje funkcija obradivosti (predavanja), Zagreb, 2007.
- [9] König, Wilfried: Fertigungsverfahren, Band 1, VDI Verlag, Düsseldorf, 1991.
- [10] Shaw, Milton C. : Metal cutting principles, Oxford University Press, New York, 2005.
- [11] Stupnišek M., Cajner F.: Osnove toplinske obradbe materijala, FSB, Zagreb, 1996.
- [12] Krumes, Dragomir: Toplinska obradba, Sveučilište u Osijeku, Slavonski Brod, 2000.
- [13] Wuhib, Yeshitila: Optimalni režim rada kod obrade teško obradivih materijala, Magistarski rad, FSB, Zagreb 1989.
- [14] J. F. Kelly, M. G. Cotterel: "Minimal lubrication machining of aluminium alloys". Na internetu (www.sciencedirect.com/) od 9 siječnja 2002.
- [15] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2002.
- [16] www.trens.sk, Pristupljeno 10.03.2011.
- [17] www.kistler.com/, Pristupljeno 10.03.2011.